



Rodrigo Jorge Silva Francisco

Licenciado em Ciências de
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Sistema Inteligente de Gestão de Armazenamento de Energia

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: João Francisco Alves Martins,
Professor Associado,
DEE, FCT, Universidade NOVA de Lisboa

Co-orientador: Rui Miguel Amaral Lopes,
Professor Auxiliar Convidado,
DEE, FCT, Universidade NOVA de Lisboa

Júri

Presidente: Prof. Doutor João Almeida das Rosas
Arguente: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina
Vogal: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2018

Sistema Inteligente de Gestão de Armazenamento de Energia

Copyright © Rodrigo Jorge Silva Francisco, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

"The scientists of today think deeply instead of clearly. One must be sane to think clearly, but one can think deeply and be quite insane."

- Nikola Tesla.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, gostaria de expressar a minha gratidão a todas as pessoas que direta ou indiretamente me permitiram alcançar patamares inimagináveis como este.

Começo por agradecer ao Professor João Martins não só pelo apoio incondicional e disponibilidade mas também pelo excelente ambiente de trabalho demonstrado. Quero ainda expressar o meu mais sincero agradecimento pela confiança que depositou em mim desde o momento de atribuição da dissertação até aos dias de hoje. Agradeço também ao Dr. Rui Lopes por toda a ajuda, disponibilidade e pelas sugestões dadas ao longo desta dissertação, que em muito contribuíram para este resultado final.

Gostaria também de agradecer aos elementos do corpo docente do Departamento de Engenharia Eletrotécnica, por todos os ensinamentos que me foram transmitidos.

De uma forma muito especial quero agradecer à Andreia Ribeiro pelo apoio e amizade que tão importante foi para aquilo que sou hoje. Foi sem dúvida a minha maior parceira nesta batalha. Obrigado.

Alexandra Videira e Carlos Posse creio que nunca vou conseguir expressar o quão importantes foram na minha vida. Fizera-me ambos ver que tudo é possível e a nunca desistir. Se hoje termino esta fase da minha vida, a vós vos devo. Obrigado.

André Gomes, Fábio Pereira, Fábio Vidago, Gonçalo Cabrita, João Carvalho, João Marques, João Oliveira, José Ferreira, Ricardo Neto, Rúben Carvalho e Rui Calado, agradeço por terem sido a companhia mais presente destes anos de curso, amigos e colegas que tornaram mais suave esta caminhada, sempre com muitos momentos de descontração. Obrigado a todos.

André Coelho, Flávio Silva e José Ferreira foram (e serão) uns amigos para a vida. Obrigado pelos bons momentos que me proporcionaram ao longo da minha vida académica.

Beatriz Alves e João Siborro, vocês têm a capacidade de tornar cada momento, único e inesquecível. Obrigado pela vossa contagiante boa disposição.

Ao Ricardo Silva e à Rita Alhandra, que logo desde o primeiro dia de faculdade, se revelaram pessoas incríveis, disponíveis em ajudar e que me apadrinharam de forma extraordinária. Um grande obrigado. Da mesma forma, agradeço à Ana Rita Salvado, Catarina Martins, João Pinto, Luís Rodrigues, Ruben Monteiro e Sara Rodrigues, por terem sido uns colegas e amigos incríveis ao longo destes anos.

A todos os colegas do NEEC, pela confiança que depositaram em mim para representar projetos que me proporcionaram experiências pessoais indescritíveis, um grande

obrigado. De igual forma, agradeço ao José Araújo, pela confiança e herança deixada. Um agradecimento muito especial, ao Alexandre Dias, Alina Vasilciuc, André Estevam, Beatriz Salvado e Carolina Lagartinho, que em momento algum deixaram de estar ao meu lado. Obrigado pela vossa amizade, resiliência, companheirismo e sobretudo, por serem o meu lado racional. Aquilo que sou hoje, sem vocês, não seria possível.

Agradeço aos meus bons companheiros da sala 3.5, João Duarte, João Morgado, João Simões, Miguel Lopes, Pedro Lopes e Ricardo Ferreira, por me proporcionarem bons momentos de trabalho e descontração enquanto trabalhava nesta dissertação.

Por fim, mas não menos importante, um grande agradecimento para toda a minha família, em especial para os meus pais e irmão, pelos valores e conselhos transmitidos que em muito contribuíram para a minha formação pessoal e educacional.

A todos os demais que contribuíram para aquilo que hoje sou, espero nunca vos decepcionar.

Rodrigo Francisco

RESUMO

Nos dias de hoje, o consumo de energia elétrica ganhou bastante importância na economia e no meio ambiente, tendo-se tornado crucial que este seja gerido da melhor forma possível. Os sistemas de armazenamento contribuem para uma melhor utilização da energia. Deste modo é possível fornecer serviços à rede e, vantagens para o consumidor. Estas vantagens passam por sistemas inteligentes de armazenamento com os consumidores no centro das preocupações, tais como a possibilidade de armazenar energia no período em que esta é mais barata e consumi-la no período em que é mais cara.

No contexto desta dissertação, foi estudada e desenvolvida, em MATLAB, uma ferramenta de gestão do consumo de energia elétrica. Esta ferramenta tem a particularidade de integrar dispositivos de armazenamento (baterias), com o objetivo de minimizar os gastos monetários com a energia. Para tal é desenvolvido um algoritmo de gestão da carga de uma bateria, tendo em conta uma previsão do consumo e preço da energia elétrica de uma residência, de modo a obter poupanças monetárias. Também foi desenvolvido uma metodologia, tendo em conta os custos resultantes para o utilizador, com o objetivo de determinar a capacidade ótima de uma bateria, isto é, a bateria com melhor relação custo-benefício para o utilizador. Neste trabalho são apresentados os passos efetuados no desenvolvimento da ferramenta de otimização capaz de otimizar o consumo de energia elétrica e o seu armazenamento, e respetivos resultados. Foram obtidos resultados com sucesso, cumprindo todos os objetivos propostos nesta dissertação.

Palavras-chave: Algoritmos Genéticos; Armazenamento de Energia; Armazenamento de Energia nas Baterias; Otimização do Consumo; Sistema Elétrico de Energia; Sistema de Gestão de Energia;

ABSTRACT

Nowadays, the consumption of electrical power has gained a lot of weight in both the economy and environmental sectors, making it crucial to manage its stability in the best way possible. Storage systems contribute towards a more efficient use of energy, thus making it possible to distribute services to the network and deliver more advantages to the consumer. These advantages include intelligent storage systems where consumers are the main concern, one of the benefits of this system is the possibility of storing energy when it is cheapest, and consuming it when it is most expensive.

In the context of this thesis, an optimization tool for electric energy consumption was studied and developed in the MATLAB platform. This tool has the peculiar ability of integrating storage devices, namely batteries, in the residence and in the distribution network. Its main objective is to minimize the monetary expenses regarding energy, thus fulfilling the specifications associated with its own battery. In the first place, a battery charge management algorithm was developed that aims at a monetary saving, taking into account a forecast of the consumption and the price of the electricity in a residence. Secondly, and considering what was developed earlier, a methodology was developed with the aim of choosing the optimal capacity of a given technology, with the main factor considered for this decision were the final energy costs to the user.

In this work the steps taken in the development of a optimization tool capable of optimizing the electric energy consumption and its storage are presented, and the results obtained. Successful results were obtained, fulfilling all the objectives proposed in this dissertation.

Keywords: Genetic Algorithms; Energy Storage; Energy Storage in Batteries; Optimization of Consumption; Electric Energy System; Energy Management System;

ÍNDICE

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Siglas	xix
1 Introdução	1
1.1 Identificação do Problema e Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 Estado de Arte e Conceitos Fundamentais	5
2.1 Sistemas de Armazenamento de Energia	5
2.2 Gestão/ Condicionamento da Procura (DSM)	7
2.3 Sistemas de Gestão de uma Bateria	11
2.3.1 Baterias	12
2.4 Algoritmos Genéticos	16
2.5 Metodologias para a Seleção da Capacidade Ótima da Bateria	19
3 Metodologia	23
3.1 Modelação	23
3.2 Ferramenta de Otimização	25
3.2.1 Algoritmos de Otimização	25
3.2.2 Função Custo	25
4 Implementação	27
5 Caso de Estudo	35
5.1 Configurar uma Simulação	35
5.1.1 Algoritmo de Gestão da Carga de uma Bateria	36
5.1.2 Metodologia para a escolha da Capacidade Ótima da Bateria	39
5.2 Otimização do Consumo de Energia	40
5.2.1 Análise de Resultados	41
5.3 Estudo do Comportamento da Bateria	43

ÍNDICE

5.3.1	Análise de Resultados	52
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	55
6.1	Conclusão	55
6.2	Trabalho Futuro	57
	Bibliografia	59
I	Anexo 1 - Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de cada mês	63
II	Anexo 2 - Comportamento de uma bateria de 13,5 kWh para vários custos por kWh	77

LISTA DE FIGURAS

1.1	Esquema relativo à configuração do sistema de gestão de energia	2
2.1	Tipos de Armazenamento de Energia	6
2.2	Formato de carga - atividades possíveis para a DMS	8
2.3	Ciclo Típico de uma Bateria	10
2.4	Esquema ilustrativo da constituição de uma população de um AG	16
2.5	Funcionamento do Algoritmo Genético	17
2.6	Cruzamento com único ponto ($K = 4$)	19
3.1	Esquema ilustrativo da ferramenta de otimização	24
4.1	Fluxograma correspondente ao algoritmo de gestão da carga de uma bateria .	28
4.2	Fluxograma correspondente à metodologia para a escolha da capacidade ótima da bateria	30
4.3	Fluxograma correspondente à metodologia para a escolha da capacidade ótima da bateria	32
5.1	Consumo para um dia típico do ano	36
5.2	Consumo para um dia típico do ano	37
5.3	Consumo para um dia típico do ano	38
5.4	Tarifa Tri-Horária da EDP	38
5.5	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Janeiro com 1ª Iteração. . . .	40
5.6	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Janeiro com 2ª Iteração. . . .	41
5.7	Relação entre o custo anual em função da capacidade uma bateria de 6.400€	43
5.8	Custo da Energia em função da capacidade de uma bateria de 6400€	44
5.9	Custo dos Ciclos dados em função da capacidade e uma bateria de 6400€ . .	45
5.10	Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 1.000€	46
5.11	Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 3.000€	47
5.12	Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 8.000€	48
5.13	Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 10.000€	49
5.14	Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 15.000€	50
5.15	Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 20.000€	51
5.16	Análise de Sensibilidade para vários custos da Bateria	53

I.1	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Janeiro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	64
I.2	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Fevereiro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	65
I.3	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Março (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	66
I.4	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Abril (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	67
I.5	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Maio (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	68
I.6	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Junho (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	69
I.7	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Julho (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	70
I.8	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Agosto (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	71
I.9	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Setembro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	72
I.10	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Outubro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	73
I.11	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Novembro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	74
I.12	Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Dezembro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração	75

LISTA DE TABELAS

2.1	Exemplos de funções utilizadas em processos de estimativa de parâmetros .	20
5.1	Resultados obtidos no estudo da capacidade ótima da bateria de 13,5 kWh .	52
6.1	Resultados obtidos no estudo de sete bateria de 13,5 kWh	56
II.1	Comportamento da bateria de 74,07 €/kWh	77
II.2	Comportamento da bateria de 222,22 €/kWh	78
II.3	Comportamento da bateria de 474,07 €/kWh	78
II.4	Comportamento da bateria de 592,59 €/kWh	79
II.5	Comportamento da bateria de 740,74 €/kWh	79
II.6	Comportamento da bateria de 1111,11 €/kWh	80
II.7	Comportamento da bateria de 1481,5 €/kWh	80

SIGLAS

AC	<i>Alternate Current</i> / Corrente Alternada.
AG	Algoritmos Genéticos.
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i> / Sistema de Armazenamento de Energia da Bateria.
BMS	<i>Battery Management System</i> / Sistema de Gestão da Bateria.
DC	<i>Direct Current</i> / Corrente Contínua.
DoD	<i>Depth of Discharge</i> / Profundidade de Descarga.
DSM	<i>Demand Side Management</i> / Condicionamento da Procura.
EDP	Energias de Portugal.
EES	<i>Energy Storage System</i> / Sistema de armazenamento de energia.
EV	<i>Electric Vehicle</i> / Veículo Elétrico.
GSS	<i>Grid Storage Solution</i> / Solução de Armazenamento em Rede.
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i> / Automóvel Híbrido Elétrico.
HFB	<i>Hybrid Flow Battery</i> / Bateria de Fluxo Híbrida.
MIGA	<i>Multi-Island Genetic Algorithm</i> / Algoritmo Genético Multi-Ilha.
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> .
PCS	<i>Power Conversion System</i> / Sistema de Conversão de Energia.
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> / Método do Enxame de Partícula.
RFB	<i>Redox Flow Battery</i> / Bateria de Fluxo Redox.
SEE	Sistema de Energia Elétrica.
SoC	<i>State of Charge</i> / Estado da Carga.
SoH	<i>State of Health</i> / Estado da Saúde.
SSC	<i>System Supervisory Control</i> / Controlo de Supervisão do Sistema.
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i> / Fonte de Alimentação Ininterrupta.

INTRODUÇÃO

1.1 Identificação do Problema e Motivação

Desde os tempos mais distantes que o ser humano procura alcançar uma melhor qualidade de vida e bem-estar acompanhado das ferramentas que o rodeiam. O facto de a sociedade ser cada vez mais evoluída, consumidora e exigente resulta numa grande necessidade do consumo de energia. A preocupação por um planeta mais sustentável, o combate contra a poluição, a utilização de energias renováveis e a redução da pegada ecológica aliada ao forte consumo de energia elétrica, levou à procura de novas soluções para que fosse possível alcançar uma melhor qualidade de vida. Assim, neste contexto, torna-se inevitável a abordagem ao tema do armazenamento de energia elétrica.

A principal contribuição desta dissertação consiste no estudo da aplicabilidade da gestão de armazenamento de energia numa habitação e na sua influência na interação com a rede elétrica. Para tal, é modelada e implementada uma ferramenta de otimização que minimiza o custo da energia elétrica pela redução da quantidade de energia pedida à rede em períodos em que esta é mais cara.

A figura 1.1 ilustra a configuração relativa a um sistema de gestão de energia. Este é composto por:

- Conversor eletrónico de potência com interligação a:
 - Sistema de armazenamento local (baterias);
 - Rede elétrica.
- Sistema local de gestão de armazenamento;
- Sistema de supervisão centralizado;
- Interfaces de comunicação com o utilizador.

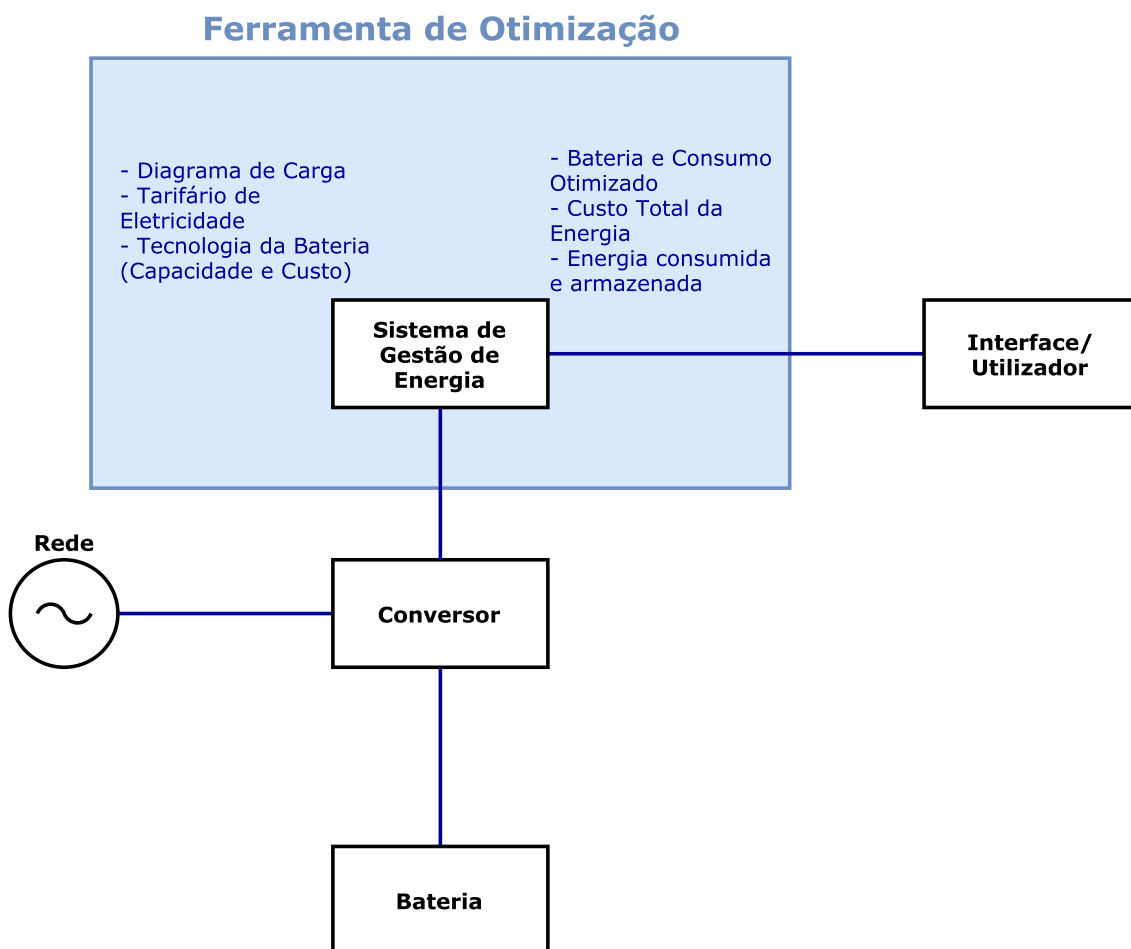


Figura 1.1: Esquema relativo à configuração do sistema de gestão de energia

A ferramenta implementada é construída em duas fases. Numa primeira fase, o perfil de carga é analisado com o objetivo de determinar a necessidade de armazenamento. Isto é, são analisadas diferentes funções para a utilização do armazenamento com o objetivo de otimizar e atenuar o consumo em períodos em que o seu custo é mais caro. Por fim, tendo em conta o que foi desenvolvido, é desenvolvida uma metodologia que otimiza a escolha da capacidade ótima da bateria.

1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se desenvolver um algoritmo de gestão da carga de uma bateria para uma residência, tendo em vista uma poupança monetária baseado numa previsão do consumo de energia elétrica da instalação e do custo da energia elétrica. Para tal, é modelada e implementada uma ferramenta de otimização de forma a reduzir a quantidade de energia pedida à rede em períodos em que esta é mais cara. Tal é conseguido pelo armazenamento de energia no período em que esta é mais barata, garantindo que esta é suficiente para atenuar as necessidades de consumo nos períodos mais caros.

Por fim, tendo em conta o que foi desenvolvido no primeiro objetivo, pretende-se desenvolver uma metodologia que visa otimizar a escolha da capacidade de uma bateria onde o principal fator considerado para a decisão diz respeito aos custos resultantes para o utilizador. Para tal, foram considerados vários investimentos iniciais para a mesma tecnologia de armazenamento, isto é, para cada investimento inicial considerado foi feita uma análise ao comportamento do sistema de armazenamento. Desta forma foi possível observar a capacidade ótima da bateria com melhor relação custo-benefício e a partir de que investimento inicial é economicamente viável ao consumidor investir numa bateria.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, cada um contendo uma parte distinta do trabalho desenvolvido.

No Capítulo 2 são revistos os conceitos fundamentais, abordagens e principais características dos sistemas de gestão e armazenamento de energia, em baterias. São ainda abordados os principais conceitos e características associadas às baterias. Com base nestas características estabeleceu-se vários critérios de comparação entre os vários tipos de baterias apresentadas. Também são apresentadas várias comparações de acordo com os critérios mais relevantes.

No Capítulo 3 é apresentado o trabalho desenvolvido que tem como objetivo criar uma ferramenta de otimização do consumo de energia, recorrendo a um sistema de armazenamento com baterias.

No capítulo 4 é apresentado uma formalização do problema de otimização. Ainda neste capítulo é apresentada a construção da ferramenta desenvolvida em MATLAB para implementar à resolução do problema.

No Capítulo 5, encontram-se os testes realizados ao modelo implementado para a tecnologia de armazenamento: Bateria *Powerwall* (da Tesla).

Por último, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões que resultaram da realização do trabalho, assim como sugestões para continuação/ melhoramento do mesmo.

ESTADO DE ARTE E CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 Sistemas de Armazenamento de Energia

O armazenamento de energia possibilita uma melhor utilização da energia.

As tecnologias de armazenamento são capazes de ajustar tanto o fornecimento de energia elétrica para a rede como a sua procura. A grande vantagem associada aos sistemas de armazenamento é a possibilidade de armazenar energia nas horas de vazio, para consumi-la nas horas de ponta. Alguns exemplos destas aplicações são estudados em [1] [2] [3].

Existem vários tipos de sistemas de armazenamento de energia que diferem de acordo com a forma como a utilizam. Estes podem ser classificados em sistemas de armazenamento de energia mecânica, elétrica, eletroquímica ou térmica [3]. A escolha do sistema de armazenamento está intrinsecamente relacionada com a aplicabilidade e características que o utilizador procura.

A importância destes sistemas de armazenamento deve-se à necessidade de obter soluções mais eficientes, ótimas e seguras. As suas principais vantagens passam pela gestão de energia, redução do consumo nos períodos mais caros e integração com outros sistemas (por exemplo fontes renováveis), entre outras. A figura 2.1 sintetiza os vários tipos de sistemas de armazenamento de energia.

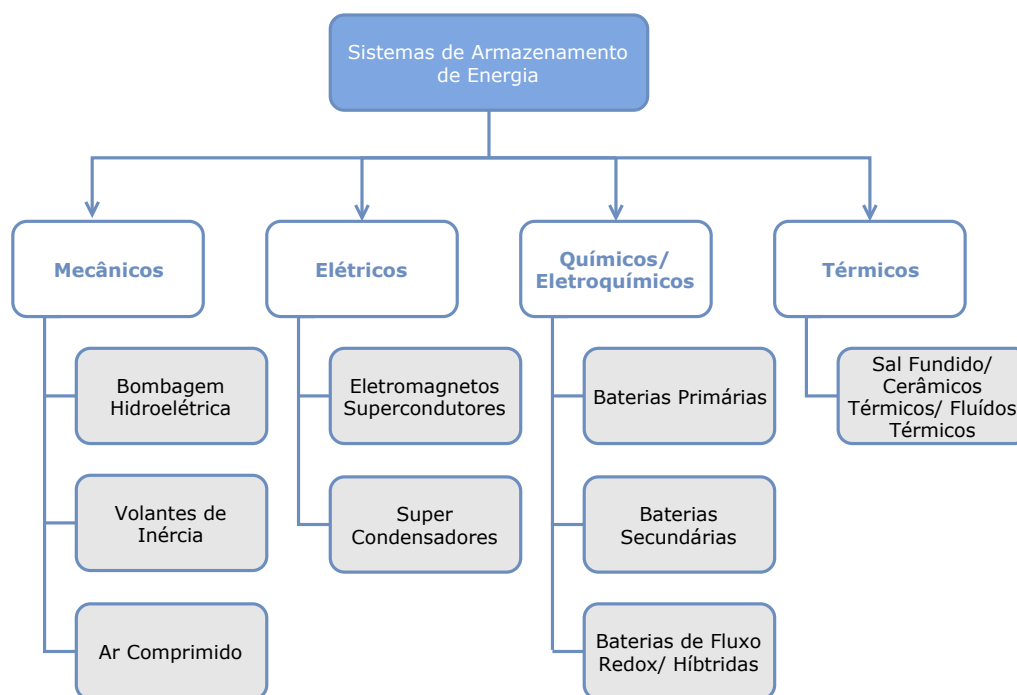


Figura 2.1: Tipos de Armazenamento de Energia. Adaptado de [3]

O foco principal desta dissertação centrar-se-à na no armazenamento em baterias. As suas principais características são [4]:

- **Capacidade de Armazenamento:** É a quantidade de energia que é possível armazenar;
- **Tempo de Descarga:** é o tempo que demora para esgotar a energia armazenada num sistema de armazenamento totalmente carregado. O tempo de descarga depende da profundidade de descarga e das condições de operação do sistema;
- **Rendimento:** é a relação entre a energia libertada e armazenada;
- **Durabilidade:** é o número de vezes que a unidade de armazenamento pode libertar energia, para qual foi projetada. É expressa em número máximo de ciclos (um ciclo corresponde a uma carga e uma descarga total, como explicado na secção 2.3.1.2). Tipicamente é esta a principal causa do envelhecimento dos sistemas de armazenamento, uma vez que está relacionado com o seu desgaste, provocado pelo seu uso;
- **Custo:** é o investimento inicial gasto num sistema de armazenamento e os respetivos custos de manutenção e operação;
- **Auto-descarga:** é a quantidade de energia armazenada que ao fim de algum tempo sem uso, se dissipa.

2.2 Gestão/ Condicionamento da Procura (DSM)

A gestão/ condicionamento da procura (*Demand Side Management* - DSM) refere-se a tecnologias (ou iniciativas) que incentivam os consumidores a otimizar o uso de energia. Como exemplos de tipos de DSM tem-se a eficiência energética e o *Demand Response* (DR). A principal vantagem associada ao DSM é a possibilidade dos consumidores reduzirem os gastos monetários associados ao consumo de energia elétrica, através do ajuste do tempo e da quantidade de eletricidade utilizada. A figura 2.2 ilustra várias atividades no âmbito do condicionamento da procura [5] [6]. Estas atividades centram-se em três grandes categorias [5]:

- **Gestão de cargas** (figura 2.2, a, b, c, f): Redistribui a procura de energia de modo a reduzir o consumo durante os períodos de maior procura para os períodos de menor procura;
- **Conservação estratégica** (figura 2.2, d): Reduz o consumo de energia, ao aumentar a eficiência energética;
- **Crescimento estratégico da carga** (figura 2.2, e): Aumenta a utilização de energia durante os períodos de menor procura.

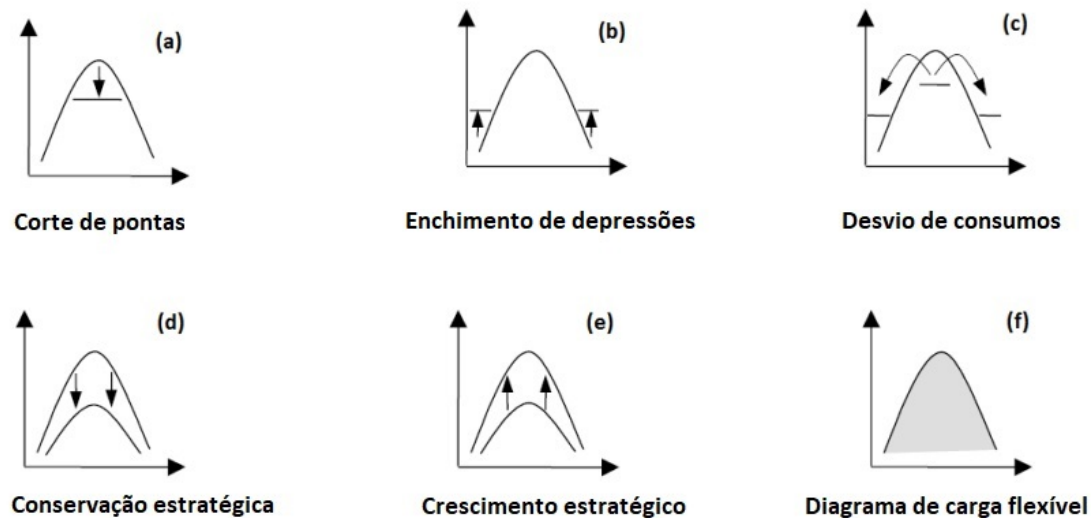


Figura 2.2: Formato de carga - atividades possíveis para a DMS Retirado de [5]

A implementação de medidas de condicionamento da procura estão relacionadas com a sua viabilidade económica (baseadas em estimativas dos custos e benefícios para o consumidor e distribuidor). O DSM apresenta seis tipos de estratégias (ilustradas na figura 2.2) que diferem de acordo com a forma como atuam na gestão da carga [7] [8]:

- **Corte de Pontas** (*Peak Clipping*): Está associada à redução de picos de carga do sistema durante períodos de tempo específicos (por exemplo, os períodos de maior taxação). Tal pode ser alcançado pelo controlo direto sobre os aparelhos dos clientes. Por exemplo, o programa Direct Load Control (DLC) permite às empresas distribuidoras alcançar essa forma de carga. Este tipo de gestão de carga é ideal para sistemas que não têm capacidade de geração suficiente para satisfazer a carga máxima durante as horas de pico.
- **Enchimento de Depressões** (*Valley Filling*): Está associado ao aumento de carga durante os períodos de menor procura. É também alcançado pelo controlo direto sobre os aparelhos dos clientes.
- **Desvio de Consumos** (*Load Shifting*): Envolve a deslocação de cargas durante o período de pico para o período de vazio, sem alterar o consumo de energia por parte do consumidor. Atualmente utilizam-se soluções de armazenamento de energia, para armazenar energia nas horas de vazio, para consumo nas horas de ponta.

- **Conservação Estratégica** (*Strategic Conservation*): Consiste na diminuição de carga não só nas horas de ponta mas também nas horas de vazio, pelo aumento da eficiência no uso de energia. Isto é, algo é mais energeticamente eficiente, se oferecer os mesmos (ou mais) serviços para o mesmo consumo de energia, sendo classificadas em:
 - Medidas Passivas: consistem na substituição de materiais/ equipamentos menos eficientes e na utilização de sistemas mais eficientes;
 - Medidas Ativas: baseadas em sistemas de controlo automático, regulação e automação. Estas medidas são geralmente implementadas com recurso a sistemas de gestão de energia.

Tipicamente estas estratégias são conseguidas através de programas impostos pelas empresas de eletricidade.

- **Crescimento Estratégico** (*Strategic Load Growth*): Está relacionada com o aumento da carga durante todas as horas do dia, pelo incentivo aos consumidores em substituir equipamentos ineficientes (de combustíveis fósseis) ou de equipamentos para melhorar a produtividade de energia. Desta forma, consegue-se a redução do custo médio de serviço, difundido o custo fixo sobre uma base maior de venda de energia.
- **Diagrama de Carga Flexível** (*Flexible Load Shape*): Está associada com a estabilidade do fornecimento de energia com a possibilidade de controlar os equipamentos dos consumidores. Tal pode ser alcançado através do controlo de cargas (podendo ser limitadas ou desligadas).

Em [9] é proposto um modelo matemático cujo objetivo é aproximar a curva do consumo à curva de carga desejada (curva correspondente ao consumo desejável de modo a obter poupanças no consumo de energia elétrica) pela redução do consumo em diferentes momentos do dia. O objetivo desta curva de carga "desejada" é compensar a fatura de eletricidade em todas as horas. Isto é, se o preço da eletricidade é elevado, o consumo de energia será pequeno e vice-versa. O método proposto tem como base o carregamento, a hora do dia e o tarifário. Outra forma de se aproveitar do excedente de energia é pelo controlo sobre o consumo usando técnicas de *Demand Response* (ilustradas na figura 2.2). Estas técnicas permitem que os gestores do sistema elétrico possam controlar diretamente cargas, ou induzir os consumidores a ligar ou desligar as cargas mediante a comunicação de preços de energia.

Em [10] é descrito um sistema de gestão de bateria (BMS) para sistemas de energia fotovoltaica. Este BMS calcula o estado de carga (SoC) de uma bateria de ácido-chumbo, de modo a determinar a sua capacidade ao longo do tempo. Na maioria dos sistemas fotovoltaicos, a bateria é responsável por mais de 40% dos custos do ciclo de vida. Pelo que, aumentar o tempo de vida útil de uma bateria, resulta num sistema mais fiável e

com menos custos operacionais associados [10]. As baterias usadas em aplicações fotovoltaicas providenciam armazenamento de energia em sistemas de energia renovável, sendo acionadas diariamente, tal como ilustrado na figura 2.3.

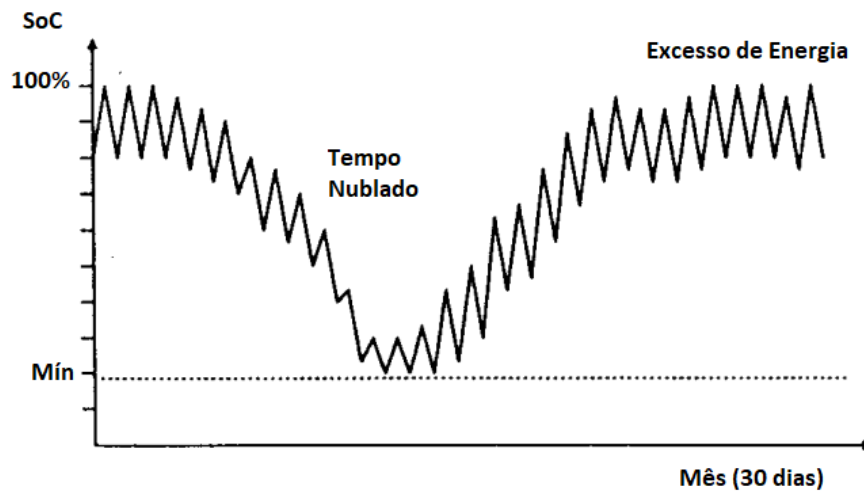


Figura 2.3: Ciclo Típico de uma Bateria. Adaptado de [10]

A figura 2.3 ilustra um consumo diário de energia praticamente constante. Neste exemplo, os autores verificaram que, quando o SoC da bateria está em baixo, o sistema tenta fornecer a demanda típica à carga, causando ciclos diários em torno do limiar de descarga profunda. Um sistema de gestão mais inteligente, monitorizaria o SoC e reduziria gradualmente a energia retirada da bateria (ou seja, reduziria a carga) [10].

Nesta dissertação pretende-se aplicar o condicionamento da procura atuando com o desvio de consumos dos períodos de pico para os períodos de menor consumo (horas de vazio do diagrama de carga). Para fazer este desvio de consumos sem alterar a utilização dos serviços de energia por parte do consumidor, propõe-se armazenar energia em horas de vazio, para uso próprio nos períodos de ponta. O principal desafio associado à gestão de sistemas de gestão da carga de uma bateria passa por identificar ações que alterem os padrões de consumo, satisfazendo em simultâneo, as necessidades energéticas do consumidor [11]. Estas ações têm como objetivo minimizar: os custos com a geração, as perdas, os desvios e tensão e frequência, interrupções e manobras de correção.

O principal desafio associado à gestão da carga tem como objetivo identificar ações que alterem os padrões de consumo, satisfazendo em simultâneo as necessidades energéticas do consumidor, nomeadamente [11]:

- Reduzir a ponta do diagrama de carga e/ou os custos de aquisição;
- Deslocar cargas no tempo, para períodos em que a energia é mais barata;
- Alterar temporariamente os parâmetros das cargas.

Destes três tipos de ações o controlo liga/desliga e os desvios de consumo são os mais usados. Estas ações têm como objetivo, minimizar os custos com a geração, perdas, desvios de tensão e frequência, desvios nas interligações, interrupções e manobras de correção. Determinar o estado de carga de uma bateria é essencial para implementar estratégias inteligentes de gestão da carga de uma bateria. Para sistemas dinâmicos, o método mais comum para determinar o SoC da bateria é o balanceamento de correntes. Este método é usado para medir a descarga da bateria em períodos de curta duração, como por exemplo em aplicações de veículos elétricos. As perdas de uma bateria variam de acordo com o seu SoC e dependem principalmente da sua temperatura e tensão.

2.3 Sistemas de Gestão de uma Bateria

Um sistema de gestão da bateria (também designado por *battery management system* - BMS) é um sistema eletrónico que gere uma bateria recarregável. O seu principal objetivo é garantir a utilização ótima da energia existente na bateria e a redução da degradação que possam estar associados à bateria. Este sistema é responsável por: monitorizar, controlar e equilibrar o sistema de energia [12]. As principais funcionalidades associadas ao seu funcionamento são [12]:

- O controlo na carga e descarga da bateria;
- A estimativa do estado de carga (SoC);
- A equalização das várias células da bateria;
- A adaptação da tensão da bateria através de um conversor DC/DC.

De uma forma geral, um sistema de gestão de baterias permite manter a qualidade da bateria durante mais tempo, evitando o desgaste ou utilização indevida da bateria. As principais funções do BMS são: gestão de baterias, gestão da potência e gestão de energia. Estas funções são responsáveis por garantir respetivamente, a utilização ótima da bateria, a potência adequada às necessidades do sistema elétrico e a eficiência na conversão de energia [12].

2.3.1 Baterias

Em termos gerais, uma bateria é um dispositivo que converge energia química (armazenada no seu interior) em energia elétrica através de uma reação eletroquímica de oxidação-redução. O principal elemento de qualquer bateria é designado por célula. Esta é constituída por quatro elementos essenciais [13] [12] [14]:

- Terminal Negativo - Fornece elétrons ao circuito onde está ligada a carga (sofre oxidação);
- Terminal Positivo - Recebe elétrons do circuito onde está ligada a carga (sofre redução);
- Eletrólito - É um líquido de boa condutividade iónica que serve como meio de transferência de iões dentro da célula entre o ânodo e o cátodo;
- Separador - É um componente que impede a ocorrência de curto-circuito entre o ânodo e cátodo.

2.3.1.1 Tipos de Baterias

As baterias podem ser classificadas em [14]:

- **Baterias Primárias (ou não recarregáveis)**

As baterias primárias não são recarregáveis, isto é, não permitem que se transforme energia elétrica em química [12]. Estas baterias têm apenas uma utilização, uma vez que não podem ser recarregadas nem reutilizadas, pois as suas reações químicas geralmente não são reversíveis.

- **Baterias Secundárias (ou recarregáveis)**

As baterias secundárias, também designadas por baterias recarregáveis, são a forma mais antiga de armazenamento de energia elétrica. A energia é armazenada sob a forma de energia química, por processos de conversão de energia baseados em reações reversíveis de oxidação/ redução eletroquímica (redox). As reações químicas são revertidas aplicando corrente elétrica à célula de forma a regenerar os reagentes químicos originais para que estes possam ser recarregados e usados novamente. As baterias secundárias mais populares são: chumbo-ácido, iões de lítio, enxofre-sódio, níquel-cádmio e cloreto de níquel-sódio [15].

As baterias de iões de lítio, quando comparadas com os outros tipos de baterias, apresentam elevada energia e potência específica e elevados ciclos de vida. Têm também elevadas eficiências de ciclo (entre 85 a 98%) e baixas auto-descargas (0,1 a 0,3%). Estas especificações estão relacionadas com características dos seus materiais constituintes, em particular dos materiais catódicos que providenciam altas densidades de energia [15].

A degradação de uma bateria é afetada por vários fatores que ocorrem em escalas de tempo semelhantes. Estes fatores são dependentes uns dos outros, como o estado da carga, o tempo e a temperatura da bateria e o *C-rate* que está relacionado com a profundidade de descarga (*Depth of Discharge* - DoD) [16]. Determinar a degradação da bateria é algo complexo devido à natureza não linear das baterias. O *C-rate* é uma medida de taxa em que uma bateria é descarregada em relação à sua capacidade máxima. Esta não linearidade deve-se à dependência da capacidade da bateria em relação à temperatura, envelhecimento e intensidade de corrente com a qual é carregada ou descarregada [12].

- **Baterias de Fluxo**

As baterias de fluxo foram inicialmente desenvolvidas pela NASA no início dos anos 70. Estas baterias armazenam e libertam energia elétrica através de reações e redução-oxidação. As baterias de fluxo classificam-se em dois tipos: redox e híbridas [17] [14] [15].

As baterias de fluxo redox (*Redox Flow Battery* - RFB) correspondem a uma classe de dispositivos de armazenamento de energia eletroquímica. O termo "redox" está relacionado com as reações químicas de redução e oxidação. Estes sistemas podem ser usados em inúmeras aplicações, como por exemplo, melhorar a qualidade de energia utilizada em UPS [14].

Já as baterias de fluxo híbridas (*Hybrid Flow Battery* – HFB) armazenam um dos eletrodos na célula eletroquímica, enquanto que, o outro eletrodo permanece no estado líquido, sendo este armazenado externamente. Desta forma, a bateria de fluxo híbrida apresenta características de baterias secundárias combinadas com características das baterias de fluxo [14].

Atualmente estas baterias são utilizadas para armazenar energia em períodos com potências nominais na ordem de grandeza MW [18]. A vantagem deste tipo de baterias deve-se ao facto de possuírem longos ciclos de vida, elevadas capacidades de potência e energia e custos de manutenção acessíveis [14]. As principais aplicações deste tipo de baterias estão associadas à produção renovável em redes isoladas e em *micro-grids* [14].

2.3.1.2 Conceitos Fundamentais

Existem vários conceitos relacionados com as baterias. Alguns deles são [16] [12] [19]:

- **Descarga:** Ocorre quando existe fluxo de eletrões do ânodo para o cátodo, através do circuito onde está ligado a carga. O circuito é completado pela migração de iões positivos para o cátodo e de iões negativos para o ânodo. Ocorrendo deste modo, uma reação de oxidação no eletrodo negativo e uma reação de redução no eletrodo positivo;
- **Capacidade:** A capacidade (C) corresponde à carga elétrica que uma bateria pode fornecer quando é descarregada durante um determinado período de tempo. É expressa em ampere-hora (Ah);
- **Capacidade Nominal (C_n):** Define-se pela carga elétrica que a bateria pode fornecer numa hora. Quanto maior a capacidade nominal da bateria, maior é a sua capacidade de armazenar energia. Este valor é fornecido pelo fabricante da bateria e pode ser encontrado nas especificações do manual da bateria;
- **Energia e Potência Específica:** É a quantidade total de energia em watt-hora (Wh) e potência watt (W) que a bateria armazena por quilograma (Kg) a uma dada corrente de descarga, respetivamente;
- **Densidade Energética:** É a quantidade de energia (em Wh) que a bateria pode armazenar por unidade de volume (m^3) numa descarga;
- **Densidade de Potência:** É a potência máxima que a bateria fornece numa profundidade de descarga específica por unidade de volume. A densidade de potência é maior quando a bateria está carregada na totalidade;
- **Ciclo de Vida:** Número de ciclos de carga e descarga de uma bateria até ao fim da sua vida útil, ou seja, até que a tensão da bateria quando carregada esteja abaixo dos 70% da sua tensão nominal.
- **Estado da Carga (*State of Charge* - SoC):** O SoC (%) é a relação, em percentagem, da energia disponível na bateria e a energia possível de armazenar. Ou seja, quando a bateria se encontra totalmente carregada, o SoC é 100%. Já quando a bateria se encontra totalmente descarregada, o SoC toma o valor de 0%. Esta relação permite saber a quantidade de energia que a bateria ainda tem para fornecer e, assim, estimar o tempo de funcionamento no sistema onde está integrada. Também permite estimar o estado atual de funcionamento de bateria, isto é, se é necessário trocar, ou não a bateria. Deste modo evita-se danos que poderiam levar à sua inutilização permanente. Tal como a capacidade da bateria, o SoC depende das condicionantes físicas internas e externas à bateria, o que o torna profundamente não linear.

O SoC de uma bateria é a medida da quantidade de carga disponível numa bateria. Este pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$SoC(t) = \frac{Q_a(t)}{Q_r} \times 100\% \quad (2.1)$$

Onde Q_a representa a carga disponível em ordem ao tempo e Q_r a capacidade restante da bateria. Um SoC a 0% significa que a bateria se encontra sem carga ativa. Um SoC a 100% significa que a bateria se encontra totalmente carregada;

- **Tempo de Vida Útil:** É representado em número de ciclos e carga/ descarga. Considera-se que uma bateria atingiu o final de vida útil quando a capacidade é reduzida a 70% a capacidade nominal. Geralmente, o tempo de vida útil depende das condições em que funciona a bateria, da sua corrente de descarga, da temperatura de funcionamento e da profundidade de descarga.

Adicionalmente, o funcionamento da bateria é influenciado por várias condicionantes, que podem levar à sua degradação ou, levar à sua incapacidade de utilização. A temperatura, a amplitude das correntes de carga e descarga e o tempo a que a bateria está sujeita a essas correntes, são as principais condicionantes que afetam de forma negativa uma bateria [12].

2.4 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos (AG) constituem um método para resolver problemas de otimização baseados na teoria da evolução de Darwin, onde os indivíduos com melhores capacidades (mais aptos) sobrevivem e geram descendentes. Deste modo, os AG realizam operações que simulam as modificações genéticas semelhantes às do processo de evolução, tais como o cruzamento e a mutação. Numa perspetiva algorítmica (figura 2.4), os cromossomas são representados por um vetor de valores (reais ou inteiros) que fazem parte de uma possível solução para um problema. Os cromossomas são compostos por genes, os quais são responsáveis pelas suas características, podendo ser trocados ou transmitidos durante o processo de reprodução. A cada geração, os indivíduos são avaliados segundo a sua aptidão, isto é, os mais aptos são selecionados para reprodução enquanto os menos aptos são eliminados, de acordo com o princípio sobrevivência do mais forte. É necessário ter em conta que diferentes cromossomas podem ter genes iguais na sua constituição [20] [21] [22] [23] [24].

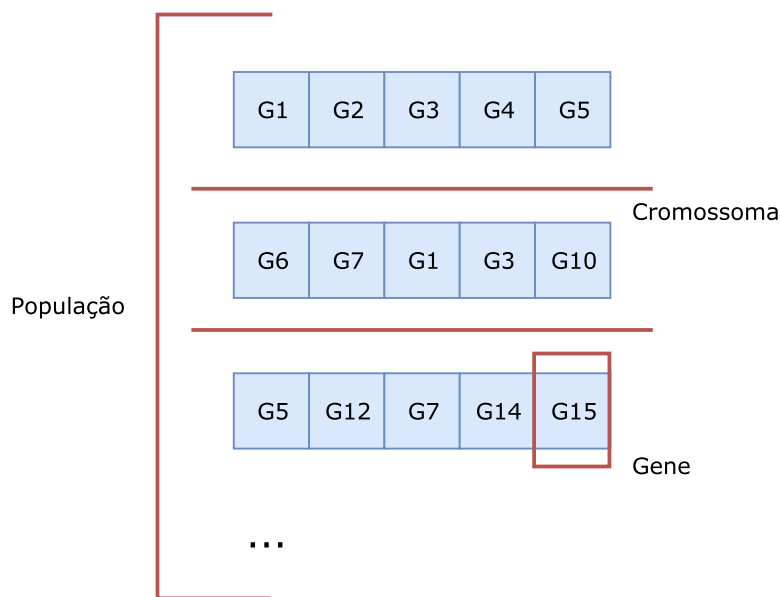


Figura 2.4: Esquema ilustrativo da constituição de uma população de um AG

A figura 2.5 ilustra um fluxograma representativo do funcionamento básico de um AG. Nele é possível observar-se os processos que o compõem. Assim, numa primeira fase, é realizada a inicialização da população e a sua avaliação. Realizado o posterior teste de paragem, procede-se à seleção de indivíduos para que se concretize a fase da reprodução entre eles. Na fase seguinte pode ser aplicado o cruzamento ou a reprodução. Por fim, sucede-se a mutação e a atualização da população existente [20].

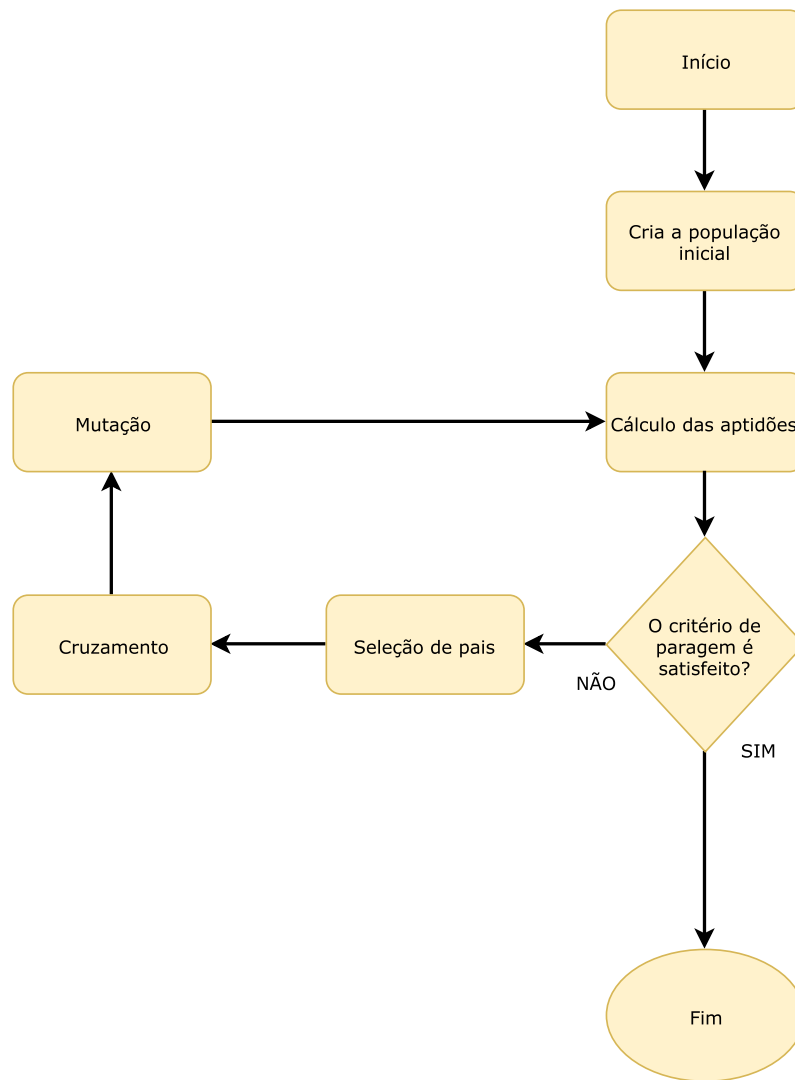


Figura 2.5: Funcionamento do Algoritmo Genético. Adaptado de [20]

Assim sendo, um AG é constituído pelas seguintes etapas [23]:

1. A população inicial de cromossomas é gerada por um processo aleatório;
2. A população é avaliada por uma função de aptidão, onde cada cromossoma recebe um valor que reflete a sua qualidade para a solução do problema;
3. São aplicados os operadores genéticos nos cromossomas, com o objetivo de modificar a população;
4. É criada uma nova geração de soluções, pelas alterações realizadas na etapa anterior;
5. As etapas 2 a 5 são repetidas, até que seja encontrada uma solução satisfatória.

Os indivíduos representam os parâmetros da função objetivo a ser otimizada. Já o conjunto de indivíduos que compõe uma geração, dá-se o nome de população. A representação dos indivíduos pode ser feita de dois modos, binária ou real, dependendo do tipo de problema. Como já foi referido, a geração da população inicial de um algoritmo é tipicamente feita de forma aleatória. É com esta população inicial que se iniciam todas as restantes etapas de um AG [20] [23]. A função aptidão mede a qualidade das soluções. Tendo como principal objetivo verificar se um determinado indivíduo representa uma possível solução para o problema [20]. Ao processo onde são escolhidos os indivíduos que serão submetidos aos operadores genéticos, dá-se o nome de seleção. Este processo pode ser realizado através de vários métodos, sendo que todos consideram a aptidão de cada um dos indivíduos, ou seja, o seu valor na função objetivo. Os principais métodos para a seleção de indivíduos são [23]:

- **Roulette Wheel Selection:** Neste método, os indivíduos são colocados numa "roleta", onde a sua área é proporcional à sua qualidade. Isto é, os indivíduos com maior aptidão têm maior probabilidade de serem escolhidos, uma vez que ocupam mais espaço. A roleta roda N vezes, sendo N o número de indivíduos necessários para serem aplicados os operadores genéticos;
- **Seleção por Ranking:** Os indivíduos são ordenados de acordo com o seu valor de aptidão, sendo-lhes atribuído um número inteiro que indica a sua posição. Deste modo, a probabilidade de cada indivíduo ser escolhido, é determinado pelo quociente entre a sua posição no *ranking* e pela soma de todas as posições. Pelo que, os indivíduos melhor posicionados têm mais probabilidades de serem escolhidos;
- **Seleção por Torneio:** São selecionados de forma aleatória k indivíduos e, com base na sua aptidão, seleciona-se o melhor. Tipicamente $k = 2$.
- **Truncation Selection:** É definida uma percentagem de X melhores indivíduos que podem ser selecionados, sendo que, todos estes têm a mesma probabilidade de serem selecionados.

Os operadores genéticos são utilizadas para criar descendentes, sendo os mais utilizados, o cruzamento e a mutação. Estes permitem a evolução da população, ao modificá-la de modo que sejam encontradas novas soluções [20].

O cruzamento tem como objetivo combinar informações genéticas de dois indivíduos (pais), para gerar novos indivíduos de melhores características que os anteriores (filhos).

O cruzamento é composto por vários métodos, dos quais se destacam: o cruzamento 1-ponto e n-pontos, o cruzamento uniforme e o cruzamento média. O mais utilizado para combinar dois indivíduos é o cruzamento com único ponto (1-ponto). Neste método, é selecionada aleatoriamente uma posição K do vetor do indivíduo e os genes de cada indivíduo, após o ponto K , são trocados, produzindo dois novos descendentes, conforme mostra a figura 2.6 (para $K = 4$) [20].

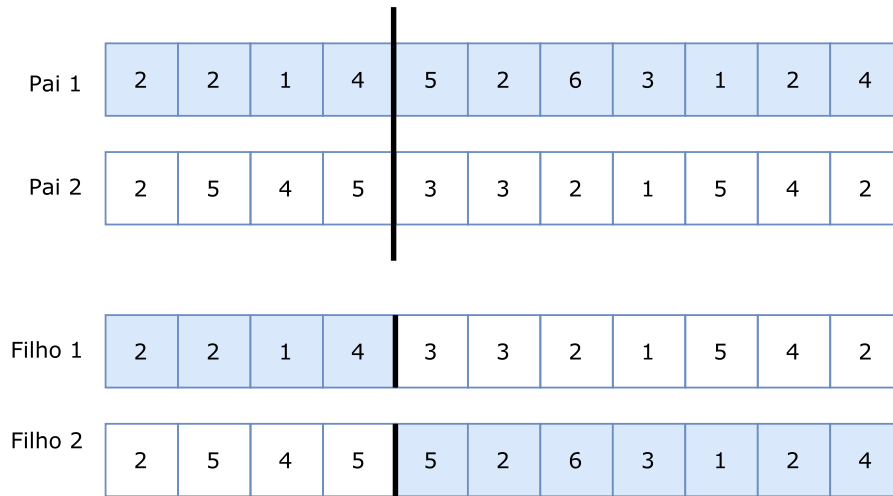


Figura 2.6: Cruzamento com único ponto ($K = 4$). Adaptado de [20]

O operador de mutação é utilizado para diversificar a informação/ herança genética das populações geradas provocando alterações a um (ou mais) genes do cromossoma. Assim, os novos indivíduos não são semelhantes aos ascendentes. Esta ideia permite que, os genes ao sofrerem uma pequena mutação, o processo não se torne puramente aleatório. Desta forma, recuperam-se boas características, eventualmente perdidas nos processos de seleção e cruzamento [25].

2.5 Metodologias para a Seleção da Capacidade Ótima da Bateria

A bateria é o principal elemento na otimização do consumo de energia. Pelo que, controlar e prever o seu comportamento em qualquer circunstância, é essencial. Tal é possível através de um sistema de gestão de baterias com acesso ao estado de carga (SoC) e estado de saúde (SoH) da bateria [12].

Determinar a capacidade ótima de uma bateria está associada à otimização do consumo de energia. O termo "otimização" refere-se ao estudo de problemas que focam na procura de um mínimo (ou máximo) de uma função através da escolha dos seus valores de variáveis reais ou inteiras dentro de um conjunto variável. Através da construção de modelos representativos dos sistemas dinâmicos em estudo, é possível aplicar técnicas matemáticas de otimização para minimizar (ou maximizar) uma função, com o objetivo de encontrar uma "solução ótima" do problema. Para a resolução destes problemas existem métodos genéricos de otimização, designados de meta-heurísticas [26]. Estes consistem na minimização de uma função objetivo através do ajuste iterativo dos parâmetros de um determinado modelo [12].

Os principais elementos para o processo de estimativa de parâmetros são:

- **Função Objetivo**

A função objetivo mede a qualidade do modelo pela comparação entre os dados experimentais e os dados modelizados. A função objetivo adapta-se ao tipo de problema que se pretende resolver. A tabela 2.1 sintetiza alguns exemplos de funções objetivo tipicamente utilizadas em processos de estimativa de parâmetros [12].

Tabela 2.1: Exemplos de funções utilizadas em processos de estimativa de parâmetros

Função Objetivo
Somatório dos erros
Somatório dos erros relativos
Função quadrática
Função para mínimos
Função relativa
Método dos mínimos quadrados
Raíz do Erro Médio Quadrático
Coefficiente de correlação de Pearson
Máxima verosimilhança
Coefficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe

- **Processo de Ajuste de Parâmetros**

O processo de ajuste de parâmetros tem como objetivo minimizar (ou maximizar) a função objetivo utilizando valores de referência e valores definido pelo modelo. A obtenção da solução pretendida é conseguida a partir do processo e do modelo adotado. Como tal, os parâmetros a serem utilizados em cada nova simulação do modelo, surgem à saída do processo. Existindo deste modo, uma repetição deste procedimento até que se atinja os resultados pretendidos.

Tendo em conta os objetivos propostos no início desta dissertação, o processo de minimização da função objetivo neste trabalho é feito com recurso a algoritmos genéticos, por melhor se adaptarem na procura de parâmetros para um modelo de bateria. Estes consistem na procura de uma solução ótima através da ação direta sobre as variáveis [12].

Os algoritmos genéticos são uma variação dos algoritmos evolutivos, sendo baseados em mecanismos de evolução biológica. Pelo que, a inspiração para a construção de modelos de otimização é baseada por teorias através das quais a Natureza, determina a quantidade de "recursos" para resolver "problemas" de sobrevivência - teorias da evolução de Darwin. Deste modo, a partir de um problema de otimização é possível encontrar uma solução ótima através de algoritmos evolutivos e das suas variações. Os algoritmos evolutivos tratam estruturas de objetos abstratos de uma população, como por exemplo, variáveis de um problema de otimização, dos quais são manipulados por operadores genéticos (inspirados na evolução biológica), que focam a busca da solução do problema [12] [26].

Alguns exemplos de modelos de otimização:

- **Algoritmos baseados em Colónias de Formigas**

Estes algoritmos são baseados no comportamento de forrageamento de formigas na formação de caminhos. Quando uma formiga encontra um caminho curto entre a colónia e a fonte de alimento, as outras formigas tenderão a seguir esse caminho. A ideia deste algoritmo é imitar esse comportamento através de "formigas virtuais" que se deslocam por um caminho, que por sua vez representa o problema a ser resolvido.

Estes algoritmos são utilizados na procura de soluções ótimas em vários problemas (por exemplo, *vehicle routing problem*). A sua principal vantagem face aos algoritmos genéticos está relacionada pelo facto da colónia de formigas se adaptar rapidamente a mudanças drásticas na sua rota. São adequados para problemas de otimização combinatória.

- **Método do Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*)**

Este algoritmo de otimização é inspirado no comportamento social e cooperativo exibido por várias espécies da Natureza, por forma a realizar as suas necessidades num espaço de pesquisa, isto é, do movimento de cada indivíduo dentro do seu grupo. Além disso, o PSO pode procurar soluções candidatas em espaços de grandes dimensões. Contudo, este método não garante que a solução ideal seja encontrada. Em termos gerais, o algoritmo guia-se por: experiência pessoal, experiência geral e pelo movimento das partículas para decidir as posições seguintes no espaço de pesquisa.

De forma a resolver problemas de otimização, este método começa por criar uma população de soluções candidatas (definidas por "partículas"), que são movidas em torno de um espaço de pesquisa através de formulas matemáticas sobre a posição e velocidade da partícula. O movimento de cada partícula é influenciado pela posição do local e da direção mais conhecidos do espaço de pesquisa. Estes são atualizadas como melhores posições, quando são encontradas por outras partículas.

Este método pode ser utilizado em problemas de otimização numérica que envolvem funções objetivo não lineares (sobretudo na área de engenharia e ciências). O PSO tem sido aplicado na otimização no planeamento de otimização do petróleo e em sistemas fotovoltaicos.

Através do estado de arte presente neste capítulo é possível sintetizar os principais conceitos associados na temática desta dissertação. No capítulo seguinte é apresentada a metodologia utilizada no âmbito deste trabalho de forma a consolidar os conceitos teóricos levantados ao longo deste capítulo.

METODOLOGIA

3.1 Modelação

O primeiro objetivo do trabalho consiste na adaptação de um modelo de gestão da energia fornecida pela rede elétrica recorrendo a um sistema de armazenamento em baterias de forma a minimizar os gastos monetários com a energia. Para tal, foi desenvolvida uma ferramenta que minimiza o custo da energia elétrica para o utilizador pela redução da quantidade de energia pedida à rede em períodos associados a preços mais elevados. Tal é conseguido armazenando energia fornecida pela rede durante o período em que esta é mais barata. A ferramenta desenvolvida apresenta as seguintes características:

- Ajusta cada simulação às necessidades do utilizador;
- Otimiza o custo da energia;
- Otimiza o tempo de vida da bateria;
- Reduz a quantidade de energia pedida à rede em períodos que esta é mais cara.

A figura 3.1 ilustra um esquema representativo da ferramenta de otimização adotada. Esta ferramenta determina a capacidade ótima da bateria de modo a obter poupanças monetárias, de acordo com o primeiro objetivo estipulado.

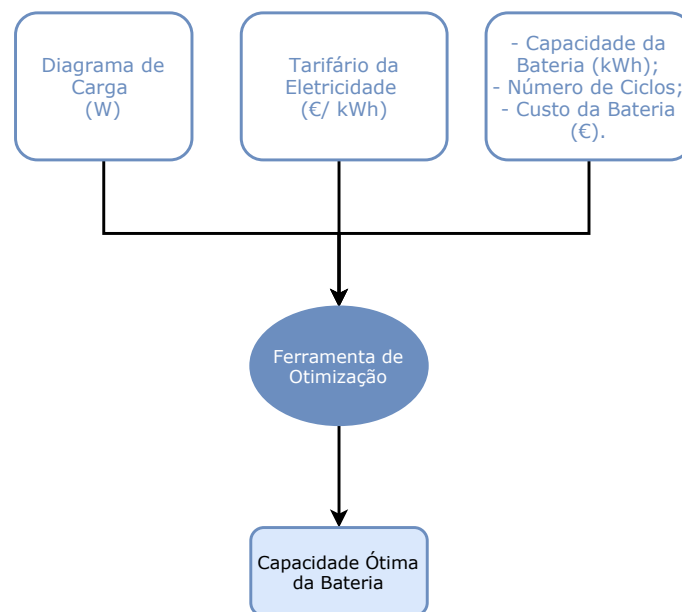


Figura 3.1: Esquema ilustrativo da ferramenta de otimização

Assim, a partir do consumo anual de uma habitação (diagrama de carga), do tarifário da eletricidade e da tecnologia da bateria (capacidade, número de ciclos e custo), a ferramenta minimiza os gastos monetários com a energia. Foi implementado uma ferramenta de otimização em MATLAB, onde foram incluídos algoritmos genéticos e uma função custo, que engloba o preço da energia proveniente da interação com a rede e bateria, para que fosse possível otimizar o consumo de energia. Em suma, a ferramenta de otimização:

- Garante que o consumidor paga o menos possível ao seu fornecedor de energia;
- Garante a otimização do funcionamento da bateria em questão;
- Minimiza o custo da eletricidade para o utilizador, pela redução da quantidade de energia pedida à rede em períodos associados a preços mais elevados.

No entanto, não garante que a capacidade da bateria seja a melhor para a situação. Assim, de forma a completar a ferramenta de otimização, o segundo objetivo proposto consiste em desenvolver uma metodologia que permita a escolha da capacidade ótima de uma bateria, onde o principal fator considerado diz respeito aos custos para o utilizador. Para tal, foi estudado o comportamento da bateria com melhor relação custo-benefício para o consumidor, tendo como referência a contribuição do custo da energia e do custo por ciclo (em função da sua capacidade).

Isto é, tendo em conta a ferramenta desenvolvida no primeiro objetivo é representado graficamente o custo anual para o consumidor em função da capacidade da bateria, considerando diferentes investimentos iniciais da bateria. Desta forma, através da função custo (definida na secção 3.2.2) é possível extrair qual a bateria com melhor relação custo-benefício. Tendo isto em conta, o desenvolvimento do estudo em causa considera:

- O consumo anual de uma habitação;
- O tarifário da eletricidade;
- Diferentes preços para a mesma bateria, de forma a ter diferentes custos por kWh.

3.2 Ferramenta de Otimização

3.2.1 Algoritmos de Otimização

Os algoritmos otimização foram incluídos na ferramenta desenvolvida. Tendo em conta os conceitos definidos na secção 2.4 e os objetivos definidos no início desta dissertação, a otimização do consumo de energia baseia-se pela redução do custo da eletricidade recorrendo ao armazenamento de energia no período em que esta é mais barata. A otimização do armazenamento de energia é feita para 24 horas considerando períodos discretos de uma hora.

Desta forma, a otimização do consumo de energia foi feita através da minimização da função objetivo (função custo definida na secção 3.2.2). O processo de minimização da função objetivo adotado neste trabalho foram os algoritmos genéticos. A sua implementação foi feita com recurso à função "@ga" do MATLAB. Os seus parâmetros foram definidos pela potência da bateria (correspondendo aos indivíduos).

3.2.2 Função Custo

A otimização do consumo de energia foi construída de modo que o consumidor pudesse reduzir o seu custo. Deste modo, a função custo, representada pela equação 3.1, engloba o preço da energia proveniente da interação com a rede e bateria (custo correspondente a um indivíduo).

$$Custo(t) = \begin{cases} \sum_{N=1}^{24} \left(E_{preço}(N) \times \frac{(Pot_{Carga}(N) - Pot_{Bat}(N))}{1000} \right), & \text{se } Pot_{Carga}(t) > Pot_{Bat}(t) \\ 0, & \text{se } Pot_{Carga}(t) \leq Pot_{Bateria}(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

Na equação 3.1, N representa o número de horas num dia, $1 \leq N \leq 24$ horas. $E_{preço}$ representa o custo da energia em €/kWh. Uma vez que, Pot_{Carga} e Pot_{Bat} estão definidas em watt, o valor 1000 do denominador serve para converter as respetivas potências para kW.

No que diz respeito à bateria, foi considerada a *Powerwall* da Tesla. As características consideradas foram:

- Preço da Bateria;
- Capacidade Útil;
- Número máximo de ciclos.

Associado à utilização da bateria, provem o respetivo desgaste à medida que esta é utilizada. A equação 3.2 define o cálculo do desgaste da bateria.

$$Desgaste_{Bateria}(N) = \sum_{N=1}^{24} \frac{Preço_{Bateria}}{Ciclos_{Vida}} \times Ciclos_{Realizados}(N) \quad (3.2)$$

Pelo que, o $Desgaste_{Bateria}$ e o $Preço_{Bateria}$ são expressos em euro (€). O facto do desgaste da bateria ser expresso em euro deve-se à necessidade de construir uma função custo que apresente na mesma ordem de grandeza o desgaste e o preço da energia. Enquanto que, $Ciclos_{Vida}$ e $Ciclos_{Realizados}$, representam respetivamente, o número de ciclos de vida e realizados. Da mesma forma que a equação anterior, N representa o número de horas num dia.

Uma vez que este algoritmo de otimização considera o custo da energia e o comportamento da bateria, é possível, pela relação das expressões 3.1 e 3.2, determinar a expressão correspondente ao cálculo do custo total da energia. Este encontra-se definido pela equação 3.3.

$$Custo_{Total}(t) = \sum_{N=1}^{24} \left(E_{preço}(N) \times \frac{(Pot_{Carga}(N) - Pot_{Bat}(N))}{1000} + Desgaste_{Bateria}(N) \right) \quad (3.3)$$

Através da metodologia apresentada neste capítulo, é possível compreender a construção da ferramenta de otimização. No capítulo seguinte é apresentada a implementação na ferramenta de otimização.

IMPLEMENTAÇÃO

Para a implementação da ferramenta de otimização é necessário ter acesso aos seguintes parâmetros, isto é:

- Informações relativas ao consumo do consumidor;
- Tarifa a qual o consumo é taxado;
- Tecnologia da Bateria.

De forma a simplificar a ferramenta de otimização e a torna-la rápida e eficiente considerou-se o consumo de um dia típico para o mês em questão. Uma vez que a otimização é feita para 24 horas em 12 meses do ano, foi criado um vetor de 288 posições, correspondente ao consumo da habitação. A nível do algoritmo, o SoC foi implementado através do somatório entre a carga disponível na bateria e a respetiva potência. Relativamente ao preço da energia, tendo em conta que depende da hora a que é taxada, esta foi colocada igualmente num vetor de 288 posições, de forma a representar o preço da energia ao longo das 24 horas (nos 12 meses).

Tal como referido na secção 3.1, a implementação da ferramenta de otimização foi alcançada com recurso algoritmos genéticos na otimização do custo total do sistema (definido pela equação 3.3). A figura 4.1 ilustra o fluxograma correspondente ao que foi realizado de forma a cumprir o primeiro objetivo proposto.

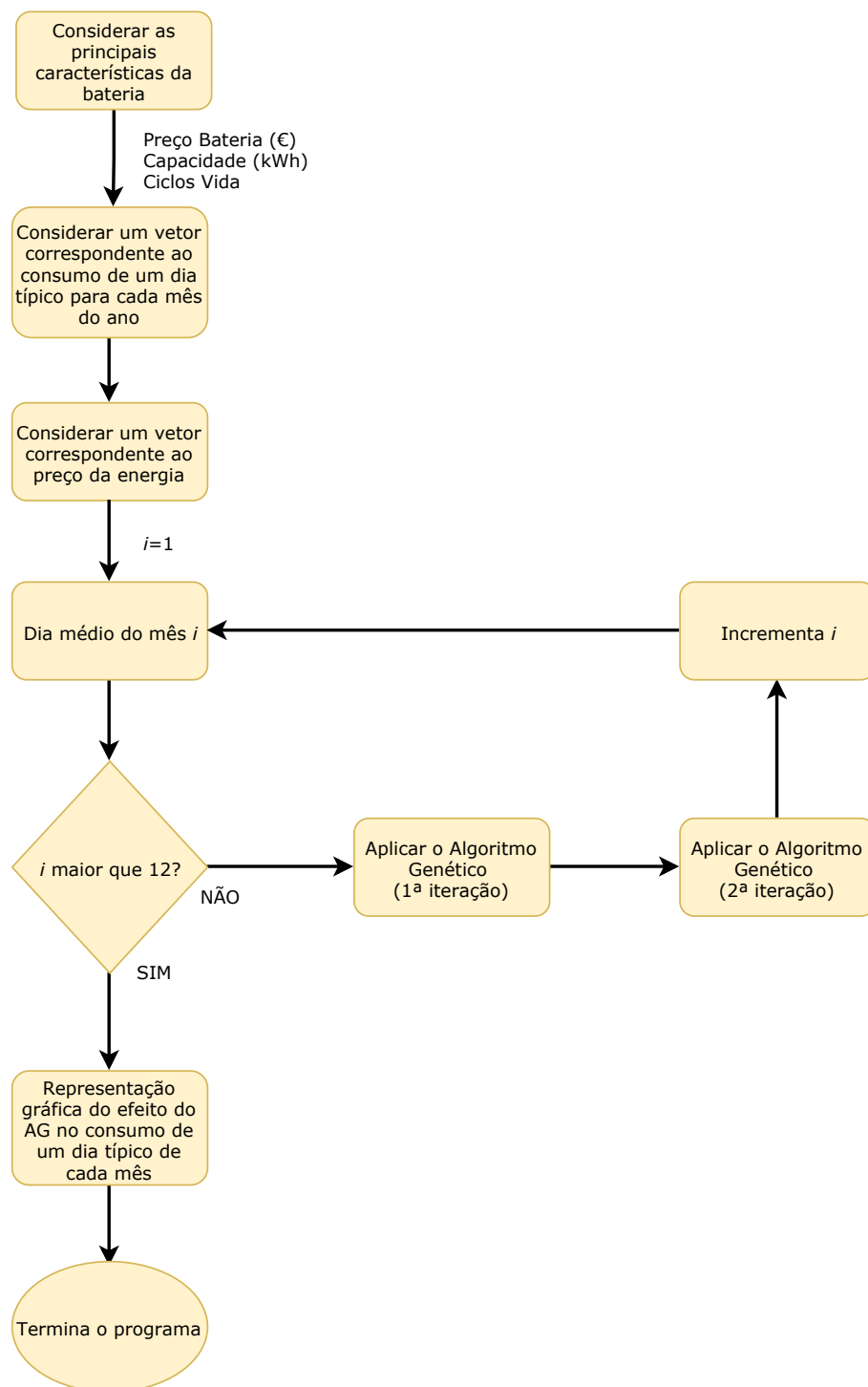


Figura 4.1: Fluxograma correspondente ao algoritmo de gestão da carga de uma bateria

Este fluxograma (figura 4.1) resume-se pelas seguintes etapas:

1. Começa-se por considerar as principais características da tecnologia de armazenamento - bateria *Powerwall* da Tesla:
 - Preço da Bateria: 6.400€;
 - Capacidade: 13,5 kWh;
 - Ciclos de Vida: 3.000.
2. Define-se um vetor de 288 posições, correspondente ao consumo anual de uma habitação (uma vez que a otimização é feita para 24 horas em 12 meses do ano, considera-se o consumo de um dia típico para cada mês do ano);
3. Define-se um vetor de 288 posições, de forma a representar o preço da energia (em concordância com o vetor definido na etapa 2);
4. Começa-se por considerar o consumo de um dia típico de Janeiro ($i = 1$);
5. Implementa-se uma ferramenta de otimização em MATLAB com recurso a algoritmos genéticos na otimização do custo total do sistema (definido pela equação 3.1). Os algoritmos genéticos são aplicados em duas iterações, considerando a população inicial resultante da primeira na segunda iteração.
6. Repete-se as etapas 4 e 5 para os restantes dias típicos até Dezembro ($i = 12$);
7. O programa termina com representação gráfica do efeito do algoritmo genético no consumo de um dia típico de cada mês. Nesta representação gráfica é possível analisar o consumo com e, sem armazenamento e o comportamento da bateria.

As figuras 4.2 e 4.3 ilustram os fluxogramas correspondentes ao que foi realizado de forma a cumprir o segundo objetivo proposto. Este fluxograma foi dividido em duas figuras de forma a facilitar ao leitor a sua análise.

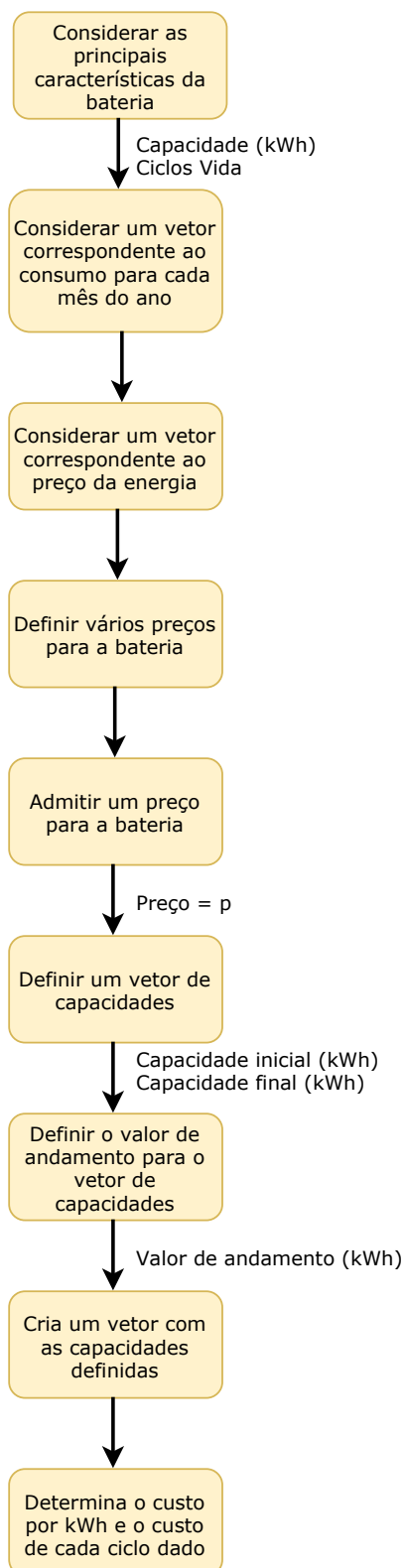


Figura 4.2: Fluxograma correspondente à metodologia para a escolha da capacidade ótima da bateria

O fluxograma ilustrado na figura 4.2 corresponde às seguintes etapas:

1. Começa-se por considerar as principais características da bateria:
 - Capacidade;
 - Ciclos de Vida.
2. Define-se um vetor de 288 posições, correspondente ao consumo anual de uma habitação (uma vez que a otimização é feita para 24 horas em 12 meses do ano, considera-se o consumo típico para cada mês do ano);
3. Define-se um vetor de 288 posições, de forma a representar o preço da energia (em concordância com o vetor definido na etapa 2);
4. Considera-se vários preços para a bateria (por exemplo 1.000, 3.000, 6.400, 8.000, 10.000, 15.000, 20.000 €);
5. Considera-se um dos valores correspondentes ao investimento inicial da bateria (definido na etapa 4);
6. Define-se um vetor de capacidades correspondente ao intervalo de capacidades onde irá ser feito o estudo do comportamento da bateria. Este vetor é responsável pela variação da capacidade da bateria em estudo e define-se por:
 - Capacidade inicial, em kWh, correspondente ao primeiro valor do intervalo;
 - Capacidade final, em kWh, correspondente ao último valor do intervalo;
 - Valor de andamento, em kWh, correspondente ao valor a incrementar dentro do intervalo de capacidades.
7. Tendo o preço da bateria (definido na etapa 5) e o vetor de capacidades, definido na etapa anterior, com recurso a uma relação linear, determina-se o custo por kWh e custo de cada ciclo dado para cada caso. Isto é, obtém-se a contribuição do custo da energia e do custo por ciclo (em função da capacidade da bateria).

O fluxograma seguinte, ilustrado na figura 4.3, corresponde à continuação do raciocínio anterior representado na figura 4.2.

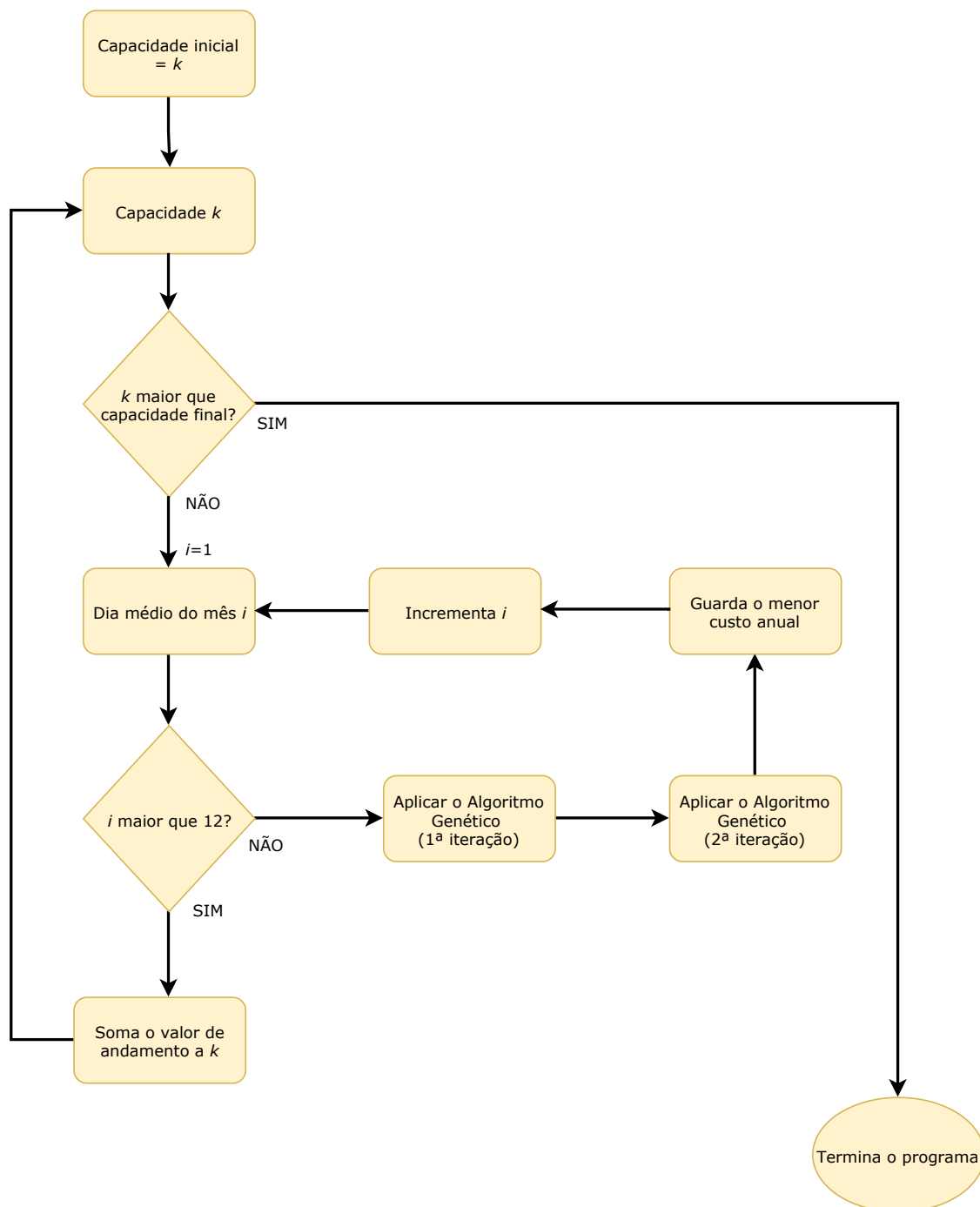


Figura 4.3: Fluxograma correspondente à metodologia para a escolha da capacidade ótima da bateria

-
8. Tendo o vetor de capacidades definido na etapa 6 (onde irá ser feito o estudo do comportamento da bateria ao longo do ano) começa-se por considerar o primeiro valor do intervalo - capacidade inicial;
 9. Partindo do primeiro valor do intervalo em causa, começa-se por considerar o consumo típico de cada mês do ano ao longo de 24 horas;
 10. Aplica-se o algoritmo genético em duas iterações (seguindo o mesmo pensamento do primeiro objetivo), sendo devolvido o menor custo anual da energia para o utilizador. Este custo é referente à otimização da bateria em função da sua capacidade;
 11. Incrementa-se o "valor de andamento", definido na etapa 6, até ao último valor do vetor de capacidades repetindo-se o processo no cálculo do menor custo anual da energia para o utilizador;
 12. O programa termina com a representação gráfica do custo anual, do custo da energia e do custo por ciclo em função da sua capacidade. Desta forma analisa-se o comportamento da bateria com melhor relação custo-benefício e a sua viabilidade económica para o consumidor;
 13. Repete-se o processo considerando outro preço da bateria definido na etapa 4. Permitindo desta forma, comparar o comportamento da bateria para diferentes custos por kWh.

Com os conhecimentos expostos ao longo deste capítulo, é possível resumir o pensamento seguido na construção da ferramenta de otimização. O primeiro fluxograma (figura 4.1) tem como finalidade responder ao primeiro objetivo da dissertação, desenvolver um algoritmo de gestão da carga de uma bateria de modo a obter poupanças monetárias no consumo de energia elétrica de uma residência. Esta ferramenta tem em conta uma previsão do consumo de um dia médio de cada mês do ano, do preço da energia elétrica e as principais características da bateria (preço, capacidade e número de ciclos). A poupança monetária, foi alcançada através da minimização da função custo com recurso a algoritmos genéticos (em duas iterações, garantido que a sucessão de descendentes é a melhor). O programa termina com a representação gráfica de um dia típico de cada mês do ano (com e sem armazenamento). Estes resultados podem ser consultados no anexo I.

O segundo e terceiro fluxograma (figuras 4.2 e 4.3) correspondem à metodologia adotada para responder ao segundo objetivo proposto nesta dissertação, isto é, criar uma metodologia que permita a escolha da capacidade ótima de uma bateria, onde o principal fator considerado diz respeito aos custos para o utilizador. Para tal, é feita uma análise de sensibilidades, variando o investimento inicial da bateria. Nesta metodologia é ainda definido um intervalo, onde irá ser feito este estudo. Do ponto de vista computacional este intervalo é designado por "vetor de capacidades". Este vetor é definido por:

- Capacidade inicial, correspondente ao primeiro valor do intervalo;
- Capacidade final, correspondente ao último valor do intervalo;
- Valor de andamento, correspondente ao valor a incrementar dentro do intervalo de capacidades.

Ou seja, para cada capacidade ("percorrida no vetor de capacidades") o algoritmo devolve o menor custo anual associado ao consumo de energia elétrica. Devido às expressões matemáticas associadas, é fácil de prever que o custo com a energia tenderá a baixar para capacidades mais altas e o custo associado ao desgaste irá aumentar para capacidades mais altas. Como a função custo é definida à custa destas duas componentes (preço da energia e desgaste), o resultado final será um gráfico de uma parábola com concavidade virada para cima, onde o "ponto mínimo" representa a capacidade ótima da bateria. Os fluxogramas foram divididos em duas figuras de modo a facilitar a sua virtualização ao leitor.

No capítulo seguinte é realizado um estudo de um caso de forma a concretizar o pensamento desenhado nos fluxogramas deste capítulo.

CASO DE ESTUDO

Neste capítulo é apresentado um caso de estudo, utilizando a ferramenta de otimização desenvolvida. Para além disso é desenvolvida uma análise aos resultados obtidos. Na secção 5.1 é apresentada a forma como a ferramenta é configurada e inicializada. Seguidamente, na secção 5.2 é mostrado o efeito do algoritmo genético no consumo energético, para um dia típico de cada mês do ano. Na secção 5.3 é estudado a bateria com melhor relação custo-benefício para o caso em estudo. Também é feito um estudo alargado para a mesma bateria, variando o seu investimento inicial.

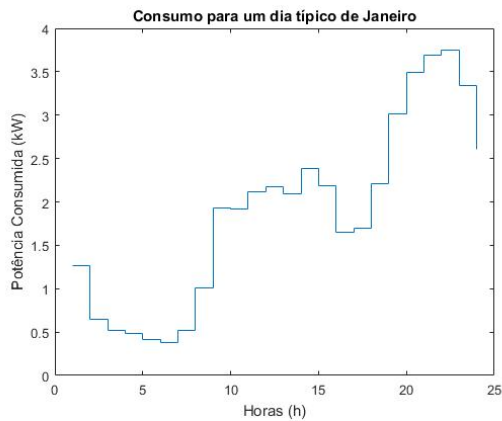
5.1 Configurar uma Simulação

Tendo em conta a modelização da ferramenta (anteriormente explicado no capítulo 3) foram considerados dados específicos de forma a obter um caso de estudo. Nas subsecções seguintes são apresentados os dados considerados neste estudo.

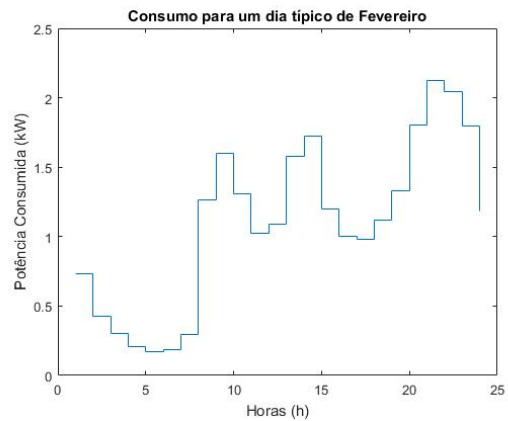
5.1.1 Algoritmo de Gestão da Carga de uma Bateria

Tal como referido anteriormente, o primeiro objetivo desta dissertação é desenvolver um algoritmo de gestão da carga de uma bateria de modo a obter poupanças monetárias no consumo de energia elétrica. Este algoritmo é configurado através do:

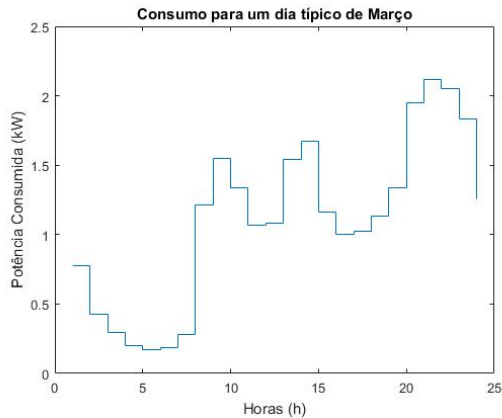
- Consumo de um dia típico para cada mês do ano, guardado em 12 vetores de 24 posições. As figuras seguinte ilustram o consumo típico considerado neste estudo (figura 5.1, 5.2 e 5.3).



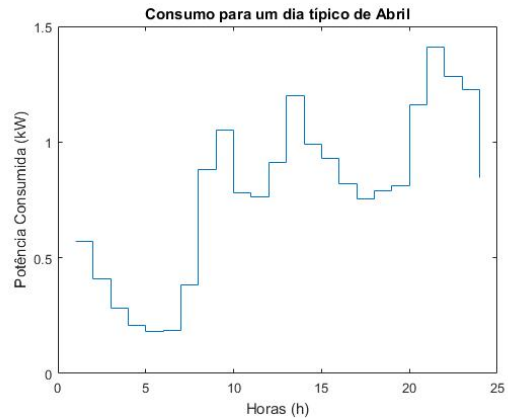
(a) Consumo para um dia típico de Janeiro



(b) Consumo para um dia típico de Fevereiro

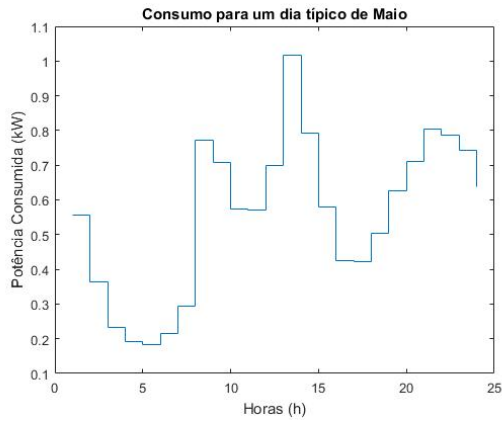


(c) Consumo para um dia típico de Março

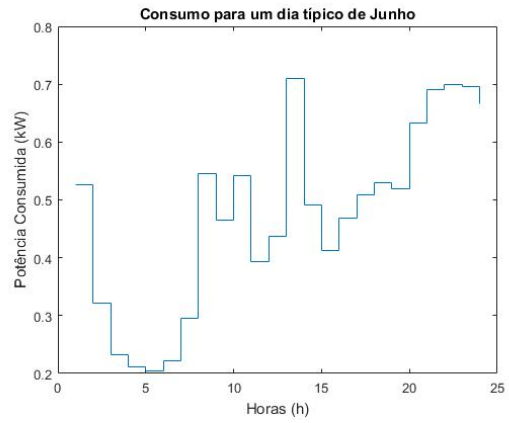


(d) Consumo para um dia típico de Abril

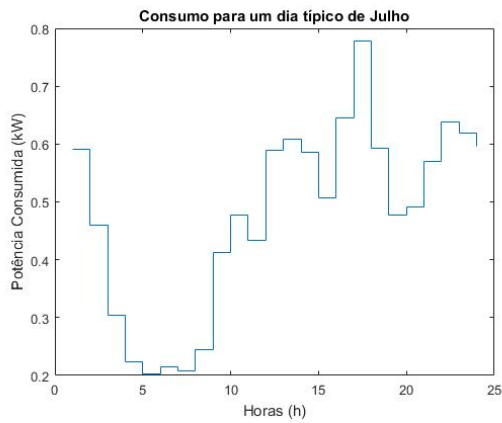
Figura 5.1: Consumo para um dia típico do ano



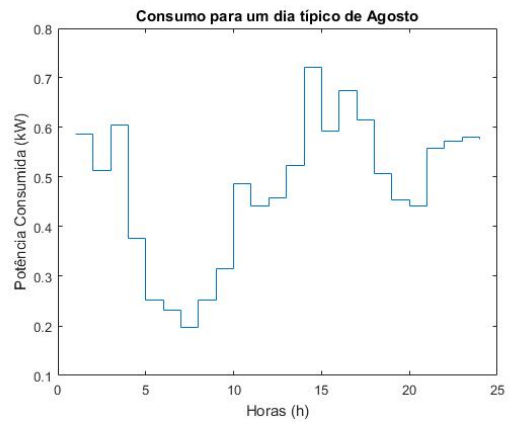
(a) Consumo para um dia típico de Maio



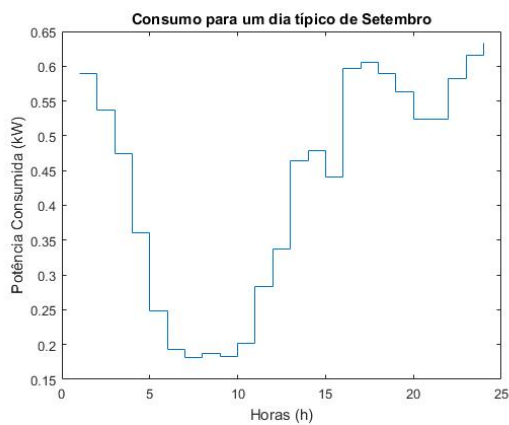
(b) Consumo para um dia típico de Junho



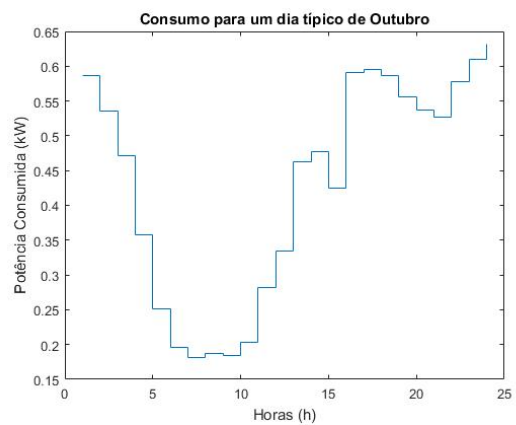
(c) Consumo para um dia típico de Julho



(d) Consumo para um dia típico de Agosto

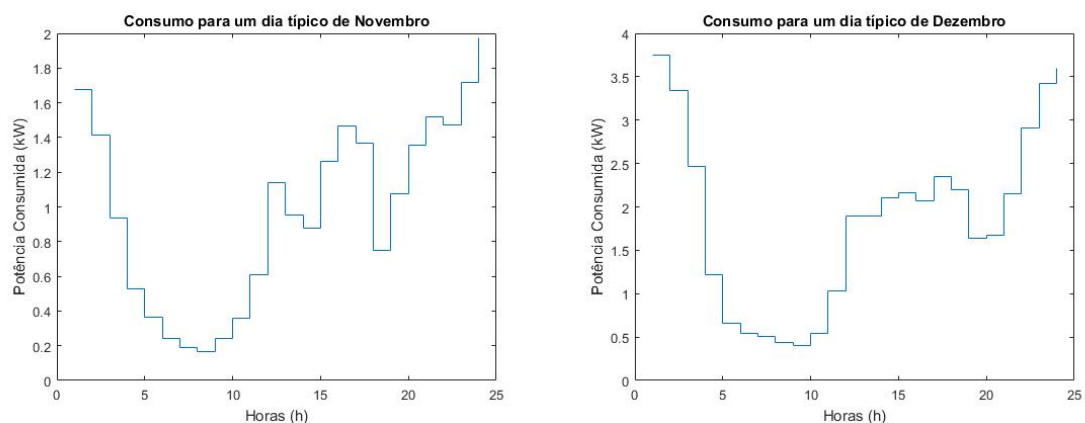


(e) Consumo para um dia típico de Setembro



(f) Consumo para um dia típico de Outubro

Figura 5.2: Consumo para um dia típico do ano



(a) Consumo para um dia típico de Novembro (b) Consumo para um dia típico de Dezembro

Figura 5.3: Consumo para um dia típico do ano

- O tarifário energético a qual o consumo é taxado. Neste estudo foi considerado a tarifa tri-horária da EDP para uma potência contratada de 3,45 kVA. Na figura 5.4 pode ser consultada com maior detalhe o tarifário considerado ¹.

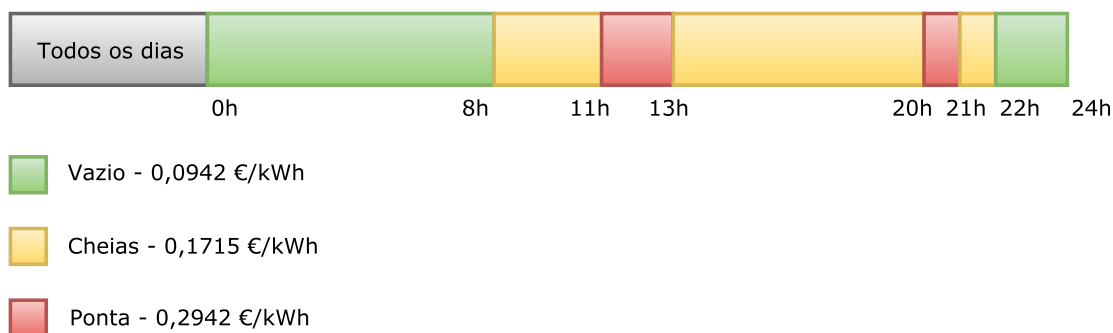


Figura 5.4: Tarifa Tri-Horária da EDP. Adaptado de [27]

- Tecnologia de armazenamento - Bateria *Powerwall* da Tesla com as seguintes características:
 - Preço da Bateria: 6.400 €
 - Capacidade: 13,5 kWh
 - Ciclos de Vida: 3.000
- Preço de venda à rede de 0€;

¹Esta tarifa tri-horária é adaptada à opção de ciclo diário (hora de verão), de modo a ocorrer em períodos de hora certa.

Relativamente à implementação do algoritmo genético, esta é feita com recurso à função "@ga" do MATLAB. São considerados os seguintes parâmetros na sua implementação:

- Função objetivo (equação 3.3);
- Número de variáveis: 24 (corresponde às 24 horas diárias);
- Estrutura "*options*". Esta estrutura contém as opções padrão para o algoritmo genético²:
 - *Crossover*: 0,7
 - *PopulationSize*: 1000
 - *Generations*: 150
- Os algoritmos genéticos são aplicados em duas iterações, considerando a população inicial resultante da primeira na segunda iteração.

5.1.2 Metodologia para a escolha da Capacidade Ótima da Bateria

Como o segundo objetivo consiste no desenvolvimento de uma metodologia que permita escolher a capacidade ótima de uma bateria, tendo em conta os custos para o utilizador, são considerados para a metodologia:

- O mesmo consumo típico para cada dia do primeiro objetivo (figura 5.1, 5.2 e 5.3);
- O mesmo tarifário energético (figura 5.4);
- A mesma capacidade e número de ciclos da bateria;
- A mesma função custo e processo de minimização.

Em suma, os dados considerados na implementação da ferramenta de otimização vão ser exatamente os mesmos com exceção do preço da bateria.

A metodologia desenvolvida consiste numa análise de sensibilidade do sistema de gestão, variando o investimento inicial da bateria entre 1.000 a 20.000 euros. Também é definido um intervalo onde será realizado o estudo da análise de sensibilidade. Este intervalo é definido por várias capacidades que irão ser alvo de estudo (variam entre 5 a 80 kWh). Isto é, para cada capacidade é calculado o menor custo anual associado ao consumo de energia elétrica (com recurso a armazenamento).

²Estes parâmetros foram escolhidos empiricamente, definidos em processos iterativos.

5.2 Otimização do Consumo de Energia

A partir dos dados definidos na secção 5.1.1 é possível observar o efeito do algoritmo genético no consumo de energia de um dia típico de Janeiro, de acordo com o primeiro objetivo do trabalho. A primeira iteração ilustrada na figura 5.5 ilustra o comportamento do AG em apenas uma iteração. A segunda iteração ilustrada na figura 5.6 representa o comportamento do AG tendo como população inicial o cromossoma resultante da primeira iteração.

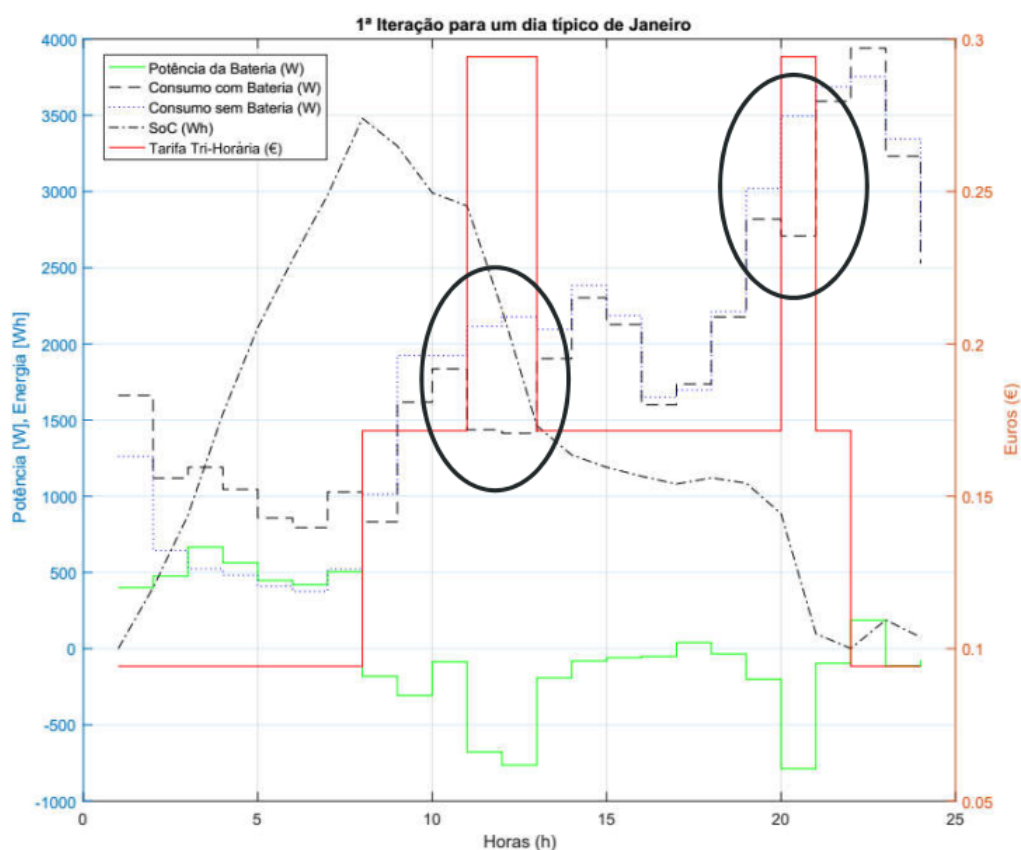


Figura 5.5: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Janeiro com 1ª Iteração.

Pela figura 5.5 verifica-se que a bateria não carregou na totalidade e que não existiram reduções significativas do consumo de energia elétrica no período em que esta é mais cara. Tal situação se deveu ao próprio algoritmo genético que descartava cromossomas quando estes possuíam um gene "mau"(ou "problemático"), mesmo se os outros genes fossem "bons". Como tal, incluiu-se uma segunda iteração que considera a população inicial o cromossoma resultante da primeira iteração. Esta solução, conferiu ao AG um comportamento iterativo, onde foram alcançadas melhorias significativas na redução do consumo de energia elétrica nos períodos de maior taxa (como se pode observar pela figura 5.6).

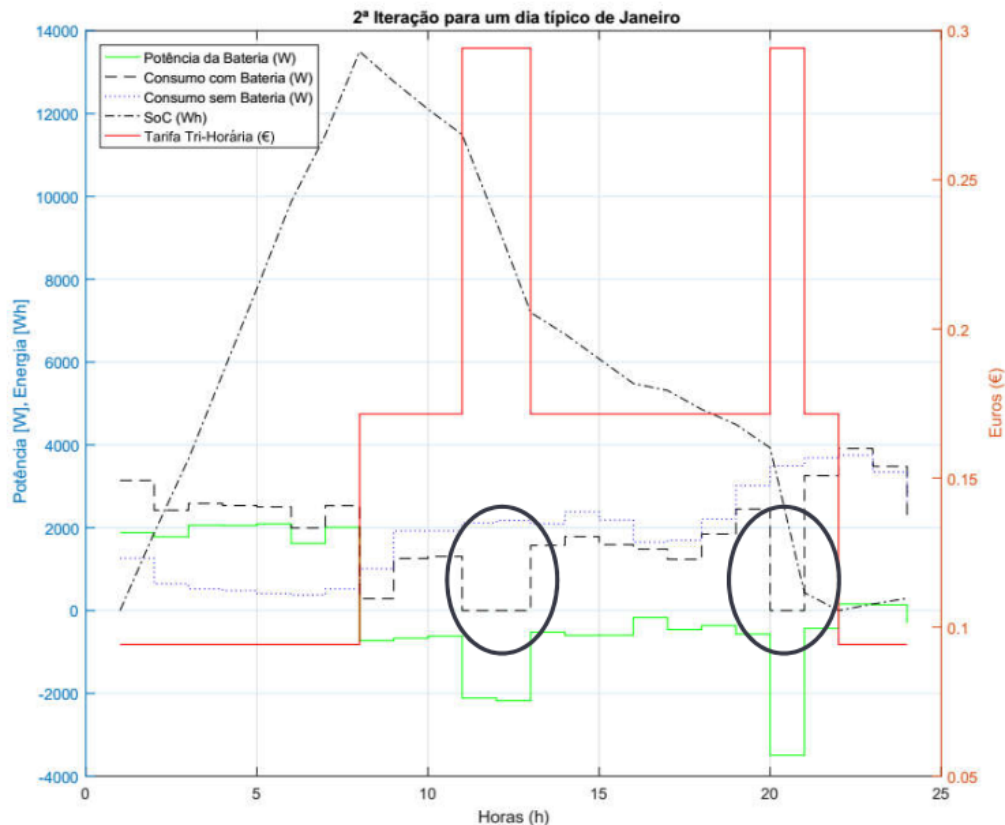


Figura 5.6: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Janeiro com 2ª Iteração.

As restantes simulações para cada dia típico de cada mês do ano encontram-se no anexo I.

5.2.1 Análise de Resultados

Através dos resultados obtidos pela secção 5.2 (em anexo I) é possível verificar que os custos associados com a energia elétrica foram minimizados, cumprindo com sucesso o primeiro objetivo proposto. Também se verifica que o consumo de energia do lado da rede no período em que esta é mais cara para um dia típico de Janeiro, Fevereiro, Março e Dezembro é atenuado (nunca chega a ser nulo). Enquanto que, para um dia típico de Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro, Outubro e Novembro é totalmente zero. Tal situação se deve, ao facto do consumo de energia ser maior nos meses de inverno e das restrições da própria bateria, isto é, da sua capacidade. Embora se tenha conseguido obter poupanças monetárias no consumo de energia nos dias de Janeiro, Fevereiro, Março e Dezembro, uma bateria de 13,5 kWh é insuficiente para anular na totalidade o consumo de energia elétrica nos períodos em que esta é mais cara. Uma bateria de maior capacidade iria minimizar (ainda mais) os custos com a energia elétrica nestes dias.

Também se verifica que a bateria apresenta o mesmo comportamento todos os dias. Inicia e termina o dia com carga zero, devido ao facto do algoritmo otimizar o tempo de vida da bateria e ajustar cada consumo às necessidades do utilizador. Carrega até às 8h (período em que a energia elétrica é mais barata). A partir desse instante o consumo pela rede elétrica é atenuado de forma a pagar o menos possível, uma vez que, a partir das 8h o custo da energia elétrica é mais caro. Apenas nos dias de: Janeiro, Fevereiro, Março e Dezembro existe algum consumo de potência em interação com a rede elétrica, nas horas de cheia (8h-11h, 13h-20h e 21h-22h). Já nas horas de ponta (11h-13h e 20-21h) não existe potência consumida em interação com a rede elétrica. Enquanto que, nos meses de: Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro, Outubro e Novembro não existe potência consumida pela rede elétrica nas horas de cheia e de ponta.

Mais se observa, para a bateria de 13,5 kWh esta é carregada na totalidade nos meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Novembro e Dezembro. Em Maio a bateria é carregada até (aproximadamente) 9 kWh. Nos meses de Junho, Julho e Agosto é carregada até 7,5 kWh. Por fim, nos meses de Setembro e Outubro é utilizada menos de metade da sua capacidade total, 6 kWh. Daqui conclui-se que, a bateria tem um comportamento adaptativo ao consumo do consumidor. Isto é, como existe maior consumo nos meses de inverno, é armazenada mais energia, comparativamente aos meses de verão onde há menor consumo.

Analisando todas as simulações efetuadas para cada dia do mês, é possível observar que a bateria assume um comportamento semelhante em todos os dias. Pelo que se destaca as seguintes observações:

- A bateria começa e termina com capacidade zero;
- A bateria faz um ciclo por dia;
- Não existe praticamente consumo, do lado da rede, nos períodos mais caros;
- O comportamento do sistema é adaptável ao consumo do utilizador, tal é visível pelos meses de inverno e verão.

Por fim, como já mencionado, através da análise das figuras referentes à primeira iteração verifica-se que não existiram reduções significativas do consumo de energia elétrica no período em que esta é mais cara. Pelo que, foi necessário implementar uma otimização com 2 iterações, como já referido anteriormente. Deste modo, como se pode observar, foram alcançadas melhorias significativas na redução do consumo de energia elétrica nos períodos de maior taxação. Esta alteração implementada no AG, permitiu-lhe conferir um comportamento iterativo e atingir resultados com sucesso.

5.3 Estudo do Comportamento da Bateria

A partir dos dados definidos na secção 5.1.2 é possível determinar a capacidade ótima da bateria, considerando os custos para o consumidor, através: da contribuição do custo da energia e do custo dos ciclos dados, em função da capacidade. Como já referido na secção 5.1.2, irá ser feito um estudo de um caso específico variando o preço da bateria entre 1.000 a 20.000 euros.

A figura 5.7 ilustra a relação entre custo total (num ano) em função da capacidade da bateria, considerando como investimento inicial 6.400€.

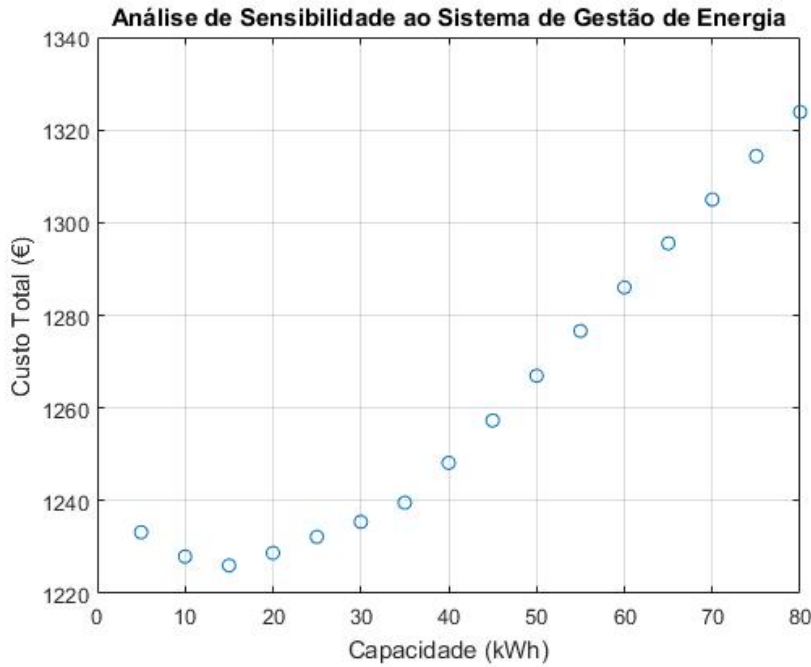


Figura 5.7: Relação entre o custo anual em função da capacidade uma bateria de 6.400€

A representação gráfica ilustrada na figura 5.7 representa a relação entre o menor custo anual para o consumidor em função da capacidade uma bateria de 6.400€. Esta representação gráfica é conseguida pelo cálculo do custo anual para o consumidor em função da capacidade da bateria. Isto é, para uma determinada capacidade e através da equação 5.1 (já mencionada no capítulo 3) é calculado o custo total para cada dia típico do mês do ano. Através do custo para cada dia do mês, determina-se o respetivo custo anual.

$$Custo_{Total}(t) = \sum_{N=1}^{24} \left(E_{preço}(N) \times \frac{(Pot_{Carga}(N) - Pot_{Bat}(N))}{1000} + Desgaste_{Bateria}(N) \right) \quad (5.1)$$

O cálculo do custo é feito por duas componentes: o custo da energia e o desgaste da bateria. O custo da energia, como já referido, é determinado pelo preço da energia providente da interação com a rede e a bateria. Já o desgaste será calculado, na ordem de

grandeza euro, de forma a representar a utilização da bateria. Aqui os custos associados à energia e ao desgaste, terão um papel fundamental na análise do custo total pois, são as componentes responsáveis nesta metodologia, uma vez que se está a variar o investimento inicial da bateria. Por exemplo, para uma bateria de 6.400€, cada vez que é utilizado 1 kWh, este tem um custo de 474,27€. E cada ciclo por kWh utilizado tem um custo de 0,158€.

De forma a completar a análise de sensibilidade ao comportamento do sistema de gestão (ilustrado na figura 5.7), as figuras 5.8 e 5.9 representam respetivamente, as contribuições referentes ao custo da energia e ao desgaste (mais concretamente ao custo dos ciclos dados) em função da capacidade da bateria.

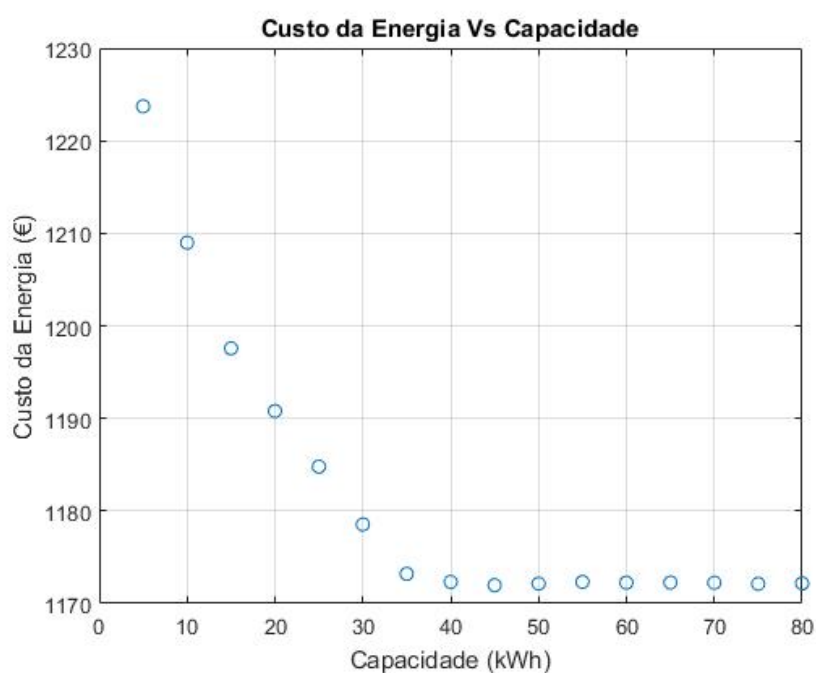


Figura 5.8: Custo da Energia em função da capacidade de uma bateria de 6400€

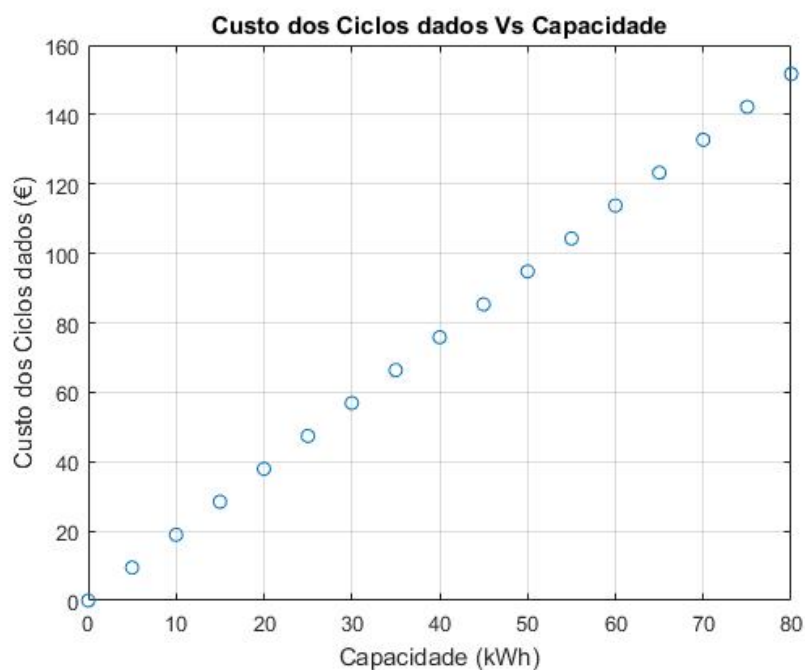
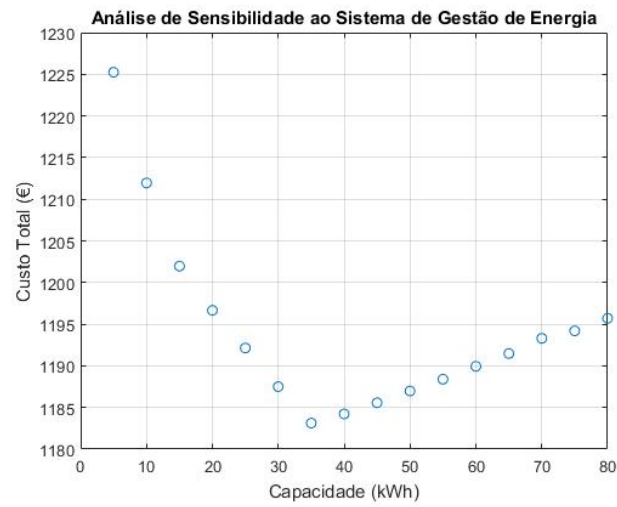


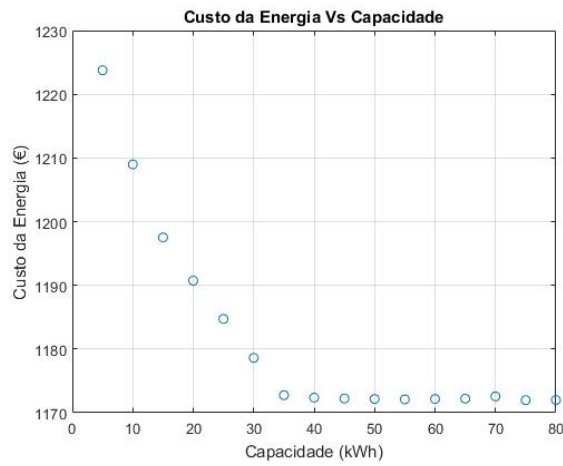
Figura 5.9: Custo dos Ciclos dados em função da capacidade e uma bateria de 6400€

Tal como seria expectável, à medida que a capacidade da bateria aumenta, o "Custo da Energia" diminui e o "Custo dos Ciclos dados" aumenta. Esta análise encontra-se em maior detalhe na secção 5.3.1

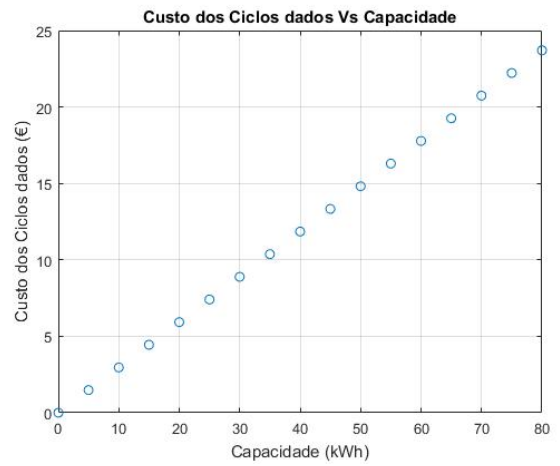
Seguidamente, repetiu-se o processo variando o investimento inicial da bateria em questão. Isto é, para cada investimento considerado, realizou-se uma simulação de modo a identificar qual a bateria com melhor relação custo-benefício para o consumidor. As figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 ilustram o comportamento do sistema para uma bateria entre 1.000 a 20.000 euros. Estas simulações seguem a mesma lógica da figura 5.7, diferindo apenas no seu investimento inicial. Em anexo II é possível consultar em maior detalhe, os dados comportamentais dos vários preços considerados para a bateria.



(a) Relação entre o custo anual em função da capacidade uma bateria de 1.000€



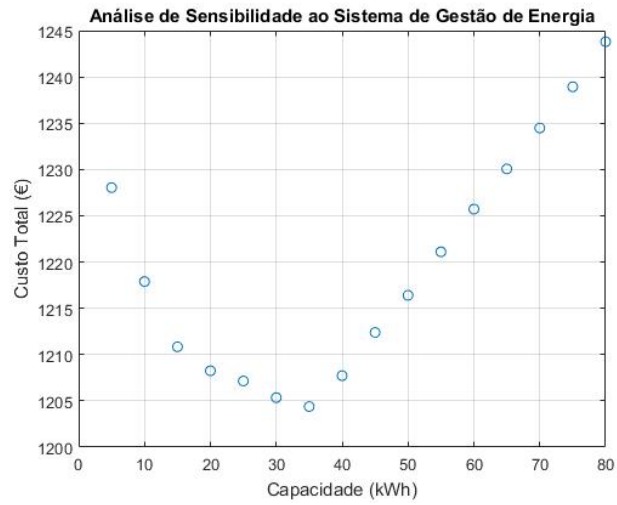
(b) Custo da Energia em função da capacidade de uma bateria de 1.000€



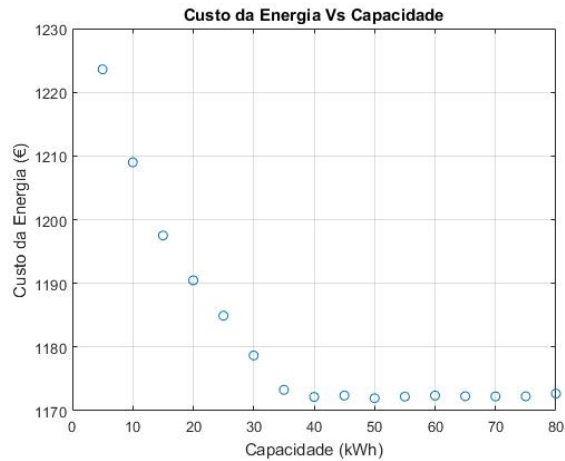
(c) Custo dos Ciclos dados em função da capacidade de uma bateria de 1.000€

Figura 5.10: Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 1.000€

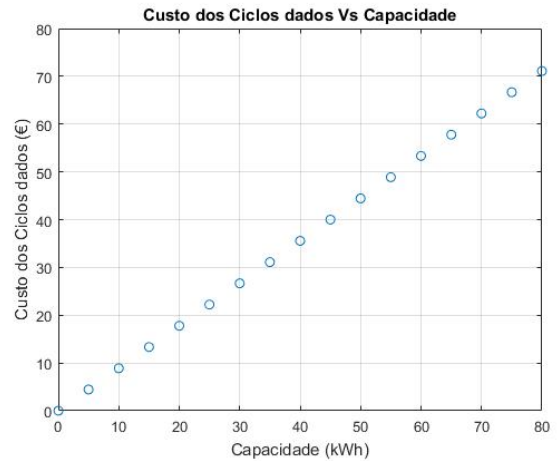
5.3. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA BATERIA



(a) Relação entre o custo anual em função da capacidade uma bateria de 3.000€

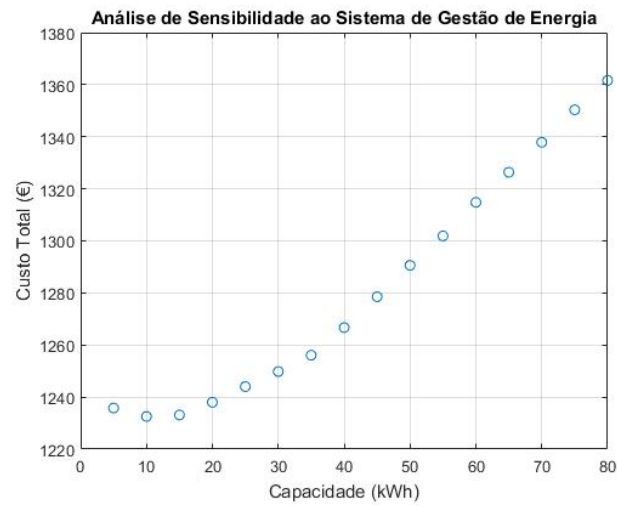


(b) Custo da Energia em função da capacidade de uma bateria de 3.000€

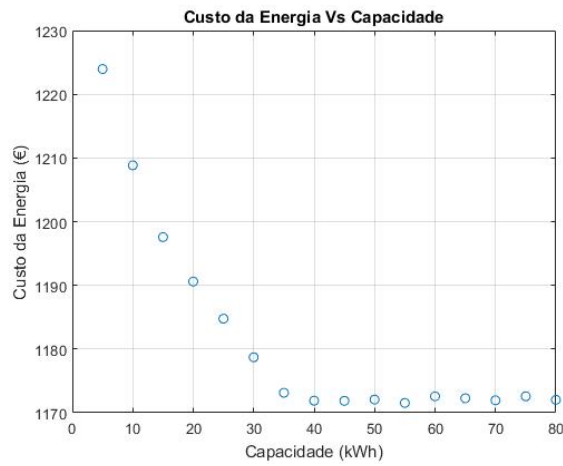


(c) Custo dos Ciclos dados em função da capacidade de uma bateria de 3.000€

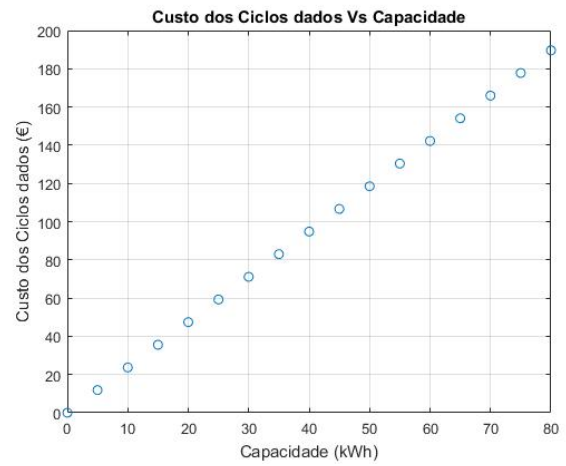
Figura 5.11: Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 3.000€



(a) Relação entre o custo anual em função da capacidade uma bateria de 8000€



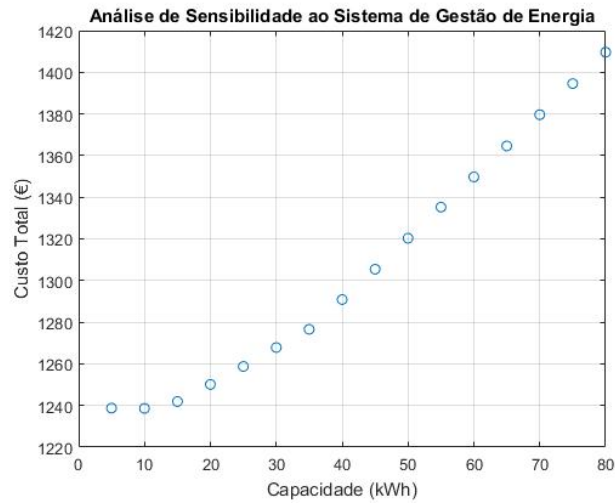
(b) Custo da Energia em função da capacidade de uma bateria de 8.000€



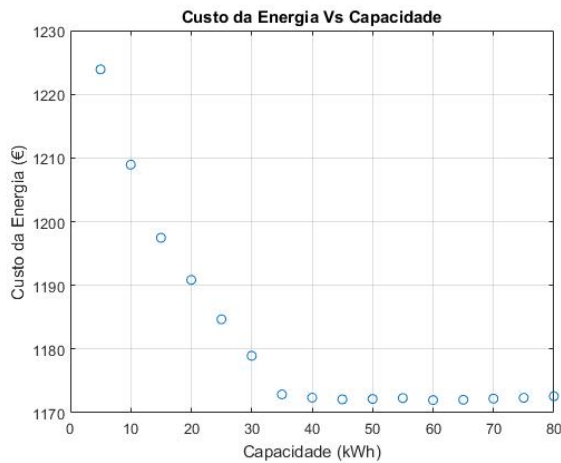
(c) Custo dos Ciclos dados em função da capacidade de uma bateria de 8.000€

Figura 5.12: Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 8.000€

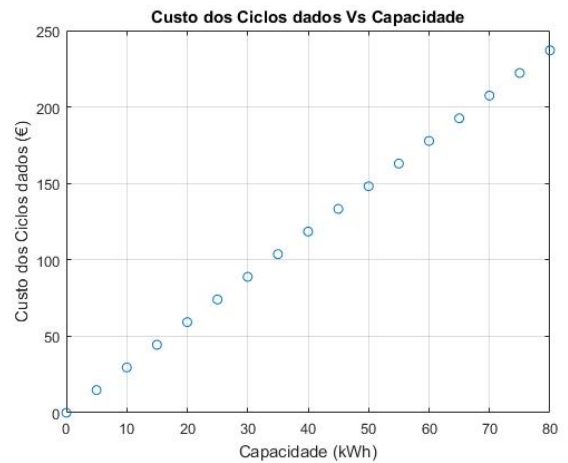
5.3. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA BATERIA



(a) Relação entre o custo anual em função da capacidade uma bateria de 10.000€

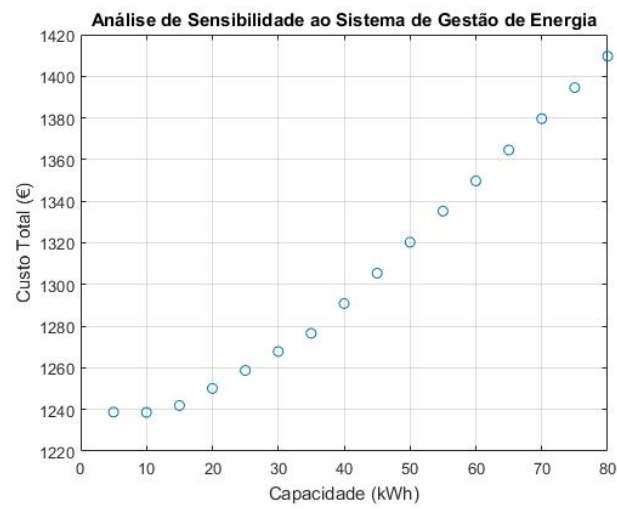


(b) Custo da Energia em função da capacidade de uma bateria de 10.000€

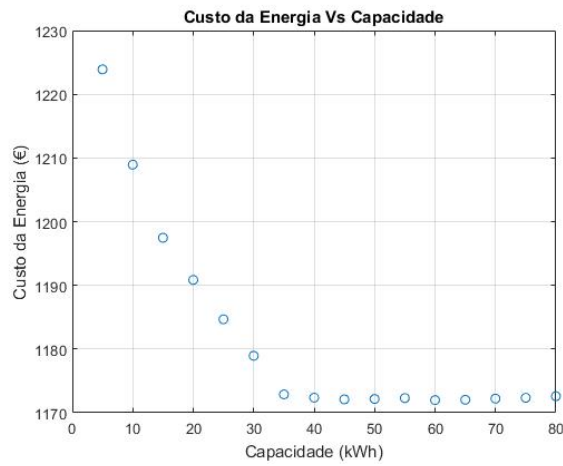


(c) Custo dos Ciclos dados em função da capacidade de uma bateria de 10.000€

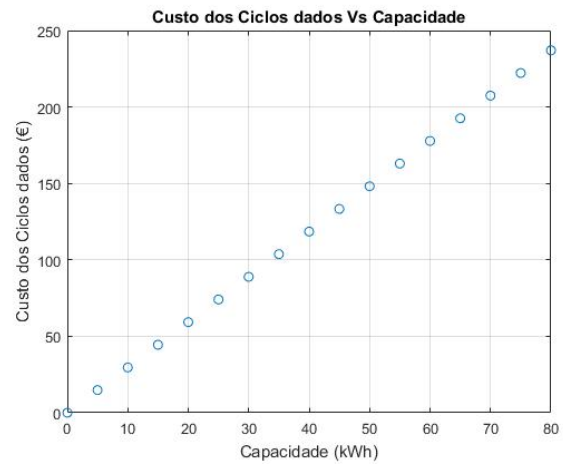
Figura 5.13: Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 10.000€



(a) Relação entre o custo anual em função da capacidade uma bateria de 15.000€



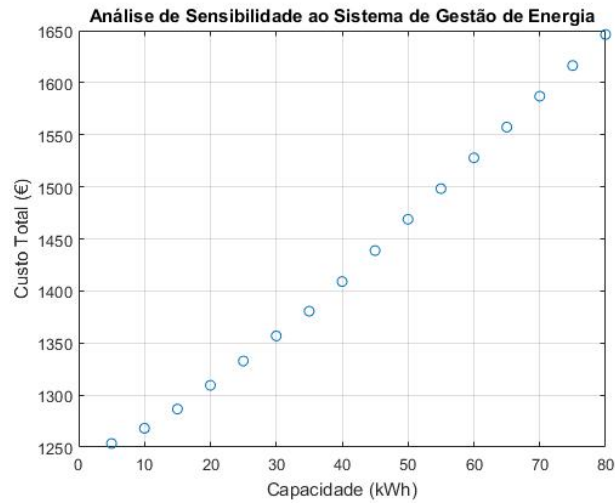
(b) Custo da Energia em função da capacidade de uma bateria de 15.000€



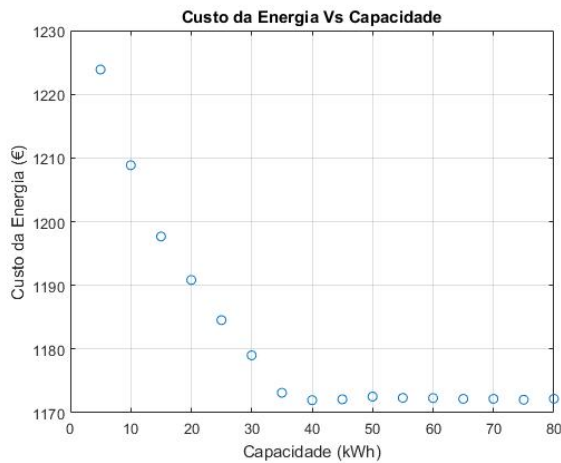
(c) Custo dos Ciclos dados em função da capacidade de uma bateria de 15.000€

Figura 5.14: Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 15.000€

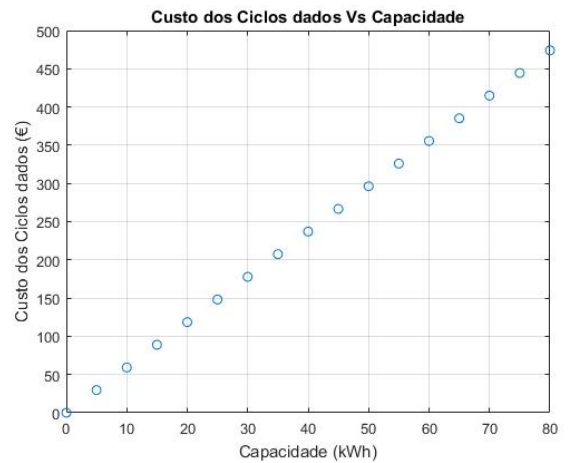
5.3. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA BATERIA



(a) Relação entre o custo anual em função da capacidade uma bateria de 20.000€



(b) Custo da Energia em função da capacidade de uma bateria de 20.000€



(c) Custo dos Ciclos dados em função da capacidade de uma bateria de 20.000€

Figura 5.15: Análise de Sensibilidade para uma Bateria de 20.000€

5.3.1 Análise de Resultados

Através dos resultados obtidos na secção 5.3 e tendo em conta o que foi desenvolvido anteriormente é possível estudar a influência da bateria no caso em estudo. Pelo que variou-se o preço da bateria Powerwall da Tesla entre 1.000 a 20.000€.

Analisando em maior detalhe o comportamento da bateria de 13,5 kWh (considerando como investimento inicial 6.400 €), verifica-se que a capacidade ótima da bateria neste caso de estudo é de 15 kWh. Este resultado parte da análise do comportamento da bateria expresso na figura 5.7. A curva expressa nesta figura representa uma parábola correspondente ao comportamento da bateria, onde o seu ponto mínimo representa a capacidade ótima para o cenário em questão.

Uma vez que a curva correspondente ao comportamento da bateria é construída às custas do "Custo da Energia" e "Custo por Ciclo" em função da capacidade da bateria, é necessário a sua análise. As figuras 5.8 e 5.9 representam respetivamente as simulações referentes à contribuição "Custo da Energia" e "Custo dos Ciclos dados" em função da capacidade da bateria. Observa-se que, o "Custo da Energia" diminui e o "Custo por Ciclo" aumenta em função da capacidade da bateria. Estes resultados correspondem ao esperado tendo em conta as expressões matemáticas apresentadas na secção 3.2.2.

A tabela 5.1 sintetiza os resultados obtidos no estudo da capacidade ótima para cada bateria considerada.

Tabela 5.1: Resultados obtidos no estudo da capacidade ótima da bateria de 13,5 kWh

Investimento Inicial (€)	Custo por kWh (€/ kWh)	Capacidade Ótima da Bateria (kWh)	Variação do Custo Anual (€)	Custo Anual sem Armazenamento (€)
1.000	74,07	35	1183 a 1225	1240,9 €
3.000	222,22	35	1204 a 1244	
6.400	474,07	15	1226 a 1324	
8.000	592,59	15	1233 a 1362	
10.000	740,74	-	1239 a 1410	
15.000	1111,11	-	1246 a 1528	
20.000	1481,5	-	1254 a 1646	

Através dos resultados obtidos, verifica-se que à medida que o investimento inicial da bateria aumenta, a sua capacidade ótima tende a diminuir. A tabela 5.1 sintetiza o comportamento da bateria para os casos representados nas figuras 5.7, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15. Relativamente aos casos representados nas figuras 5.13, 5.14 e 5.15 poderá existir um ponto ótimo, embora não se encontre no intervalo de capacidades estudado. A existir, a capacidade ótima para estes casos será menor do que 10 kWh, uma vez que as funções são (aparentemente) crescentes.

Mais se observa que, uma bateria a partir de 8.000€ não é economicamente viável para este sistema. Isto porque, o seu custo anual para o utilizador é superior ao custo que teria sem recorrer a esta tecnologia de armazenamento. Neste caso, o custo de cada ciclo

dado irá penalizar o custo total. Tal acontece porque, à medida que o investimento inicial aumenta o custo de cada ciclo tende a aumentar para capacidades mais elevadas. Estes resultados correspondem ao esperado tendo em conta as expressões matemáticas associadas. Relativamente ao "custo da energia", este tende a baixar, uma vez que armazena mais energia à medida que a sua capacidade aumenta.

Ao analisar as várias curvas correspondentes à representação da bateria com melhor relação custo-benefício (figura 5.16) verifica-se que estas são expressas em forma de parábola. Sendo que, o ponto mínimo da parábola representa a capacidade ótima para o cenário em questão. Também se verifica que à medida que o investimento aumenta, o comportamento parabólico tende a perder-se a partir dos 8.000€. Tal acontece, pela forte penalização do elevado custo dos ciclos dados. Nestes casos, o custo por ciclo é tão elevado que deixa de compensar usar a bateria.

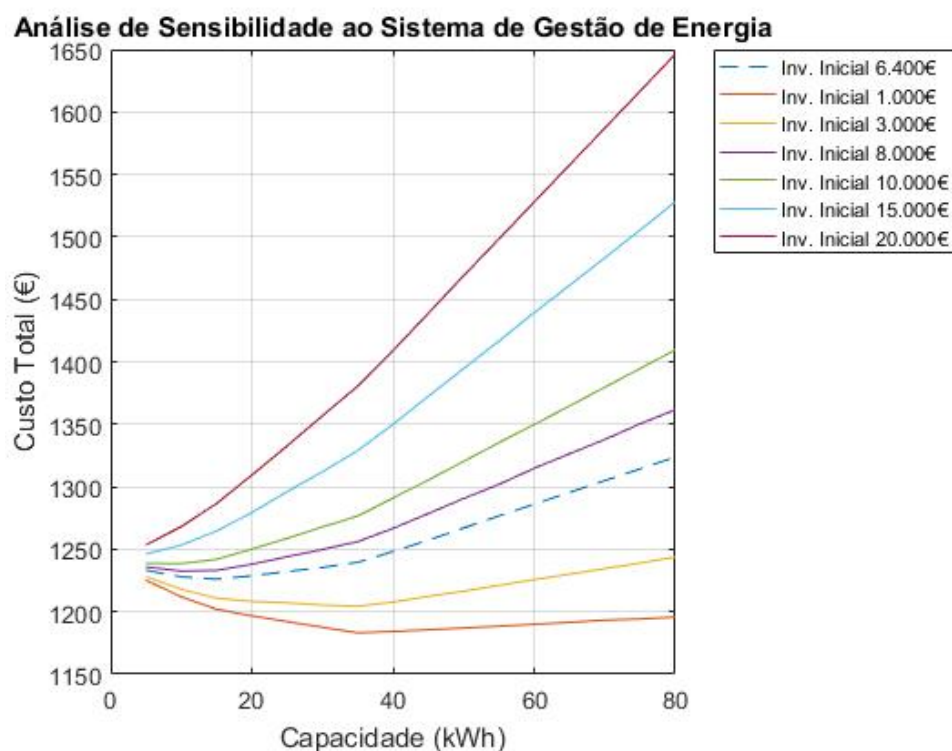


Figura 5.16: Análise de Sensibilidade para vários custos da Bateria

Como já referido, o intervalo de estudo da capacidade ótima da bateria foi entre 5 e 80 kWh, com uma variação de 5 kWh. Deve-se salientar que, quanto menor essa variação, maior será a precisão dos resultados. E consequentemente, mais tempo demora o algoritmo a apresentar resultados.

Esta análise pode ser complementada pelas tabelas referentes ao comportamento das sete baterias em estudo no anexo II.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusão

Nesta dissertação foi desenvolvida uma ferramenta de gestão da carga de uma bateria para uma residência. O estudo foi feito com base numa previsão do consumo de eletricidade da instalação e do custo da energia elétrica, de forma a minimizar os custos com a energia elétrica. Tal foi possível pela otimização do consumo de energia, mais precisamente pela redução do custo da eletricidade recorrendo ao armazenamento de energia. A otimização do consumo de energia foi feita através da minimização da função objetivo (função custo definida pela equação 6.1 mencionada também no capítulo 3), com recurso a algoritmos genéticos.

$$Custo_{Total}(t) = \sum_{N=1}^{24} \left(E_{preço}(N) \times \frac{(Pot_{Carga}(N) - Pot_{Bat}(N))}{1000} + Desgaste_{Bateria}(N) \right) \quad (6.1)$$

Os resultados obtidos para o caso em estudo foram positivos. Isto é, os custos associados com a energia elétrica foram minimizados, cumprindo com sucesso o primeiro objetivo proposto. A análise teve em consideração o consumo de um dia típico de cada mês do ano, uma tarifa tri-horária da EDP e uma bateria de 13,5 kWh. Embora tenham sido alcançadas poupanças monetárias verificou-se que para uma bateria de 13,5 kWh, esta não garante o menor custo para o consumidor num dia típico de Janeiro, Fevereiro, Março e Dezembro. Isto porque, a sua capacidade não é suficiente para colmatar as necessidades do consumidor. Já num dia típico de Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro, Outubro e Novembro a solução garante o menor custo para o consumidor, uma vez que não existe qualquer tipo de interação com a rede no período de maior taxação.

Em suma, através da análise de cada dia do mês, é possível observar que a bateria assume um comportamento semelhante em todos os dias. Pelo que se destaca as seguintes

observações:

- Nos meses de Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro e Outubro a bateria nunca é carregada no máximo;
- A bateria começa e termina com capacidade zero;
- A bateria faz um ciclo por dia;
- Não existe praticamente consumo, do lado da rede, nos períodos de maior taxaço;
- O comportamento do sistema é adaptável ao consumo do utilizador.

A inclusão de uma segunda iteração nos algoritmos genéticos foi bastante importante no âmbito desta dissertação, pois permitiu ao algoritmo uma melhoria bastante significativa na redução do consumo de energia elétrica nos períodos de maior taxaço. Permitiu também a bateria carregar no seu máximo e alcançar poupanças monetárias relevantes. Tal como referido ao longo desta dissertação, esta implementação de uma otimização com duas iterações foi necessária, porque o algoritmo estava a eliminar cromossomas quando estes tinham um "gene problemático". Os resultados obtidos com uma iteração mostravam reduções pouco relevantes e em muitos casos a bateria nem era carregada no seu máximo.

De forma a estudar o comportamento da bateria e a sua viabilidade económica, foram consideradas sete baterias de 13,5 kWh. A tabela 6.1 sintetiza os resultados obtidos neste estudo.

Tabela 6.1: Resultados obtidos no estudo de sete bateria de 13,5 kWh

Investimento Inicial (€)	Custo por kWh (€/ kWh)	Capacidade Ótima da Bateria (kWh)	Varição do Custo da Energia (€)	Varição do Custo dos Ciclos (€)	Varição do Custo Anual (€)	Custo Anual sem Armazenamento (€)
1.000	74,07	35	1172 a 1224	1 a 24	1183 a 1225	1240,9 €
3.000	222,22	35		4 a 71	1204 a 1244	
6.400	474,07	15		9 a 152	1226 a 1324	
8.000	592,59	15		12 a 190	1233 a 1362	
10.000	740,74	-		15 a 237	1239 a 1410	
15.000	1111,11	-		22 a 356	1246 a 1528	
20.000	1481,5	-		30 a 474	1254 a 1646	

Através dos resultados expressos na tabela 6.1 verifica-se que, à medida que o preço da bateria aumenta, a sua capacidade ótima tende a diminuir. Relativamente às baterias de 10.000, 15.000 e 20.000 euros, não foi encontrada a capacidade ótima, por não estar definida no intervalo de estudo considerado. Também se pode concluir que uma bateria que represente um custo anual superior a 1240,9€ não é economicamente viável para este consumidor, uma vez que o seu custo será superior ao custo que teria sem a implementação desta tecnologia. Deve-se salientar que estes resultados são válidos apenas para este consumidor, não podendo ser generalizados para outros casos.

Deste modo, para o caso em estudo, a capacidade ótima para uma bateria de 6.400€ é de 15 kWh. Esta escolha oferece ao consumidor uma poupança de 14,9€ num ano.

Assim, tendo em conta o que foi desenvolvido no primeiro objetivo, a metodologia desenvolvida otimiza com sucesso, a escolha da capacidade ótima de uma bateria, garantindo o menor custo para o utilizador. Pelo que, o segundo objetivo desta dissertação foi igualmente cumprido com sucesso.

6.2 Trabalho Futuro

De modo a complementar o estudo desta dissertação, alguns dos trabalhos que poderão ser feitos são:

- O desenvolvimento de uma interface de potência para que esta ferramenta possa ser utilizada. Isto é, desenvolver uma estrutura física onde se possa integrar esta ferramenta;
- O estudo para outras tecnologias de baterias e para outros setores (indústria, por exemplo);
- Considerar a produção de energia através de fontes renováveis, otimizando de acordo com as estimativas de produção;
- Integração com tarifas dinâmicas;
- Considerar preço de venda à rede.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Younicos, Inc. *Younicos*. Acedido em: 2017-06-15. URL: <https://www.younicos.com/case-studies/notrees/>.
- [2] K. Divya e J. Ostergaard. "Battery energy storage technology for power systems—An overview". Em: *Electric Power Systems Research* 79.4 (2009), pp. 511–520.
- [3] F. A. Bhuiyan e A. Yazdani. "Energy storage technologies for grid-connected and off-grid power system applications". Em: *Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. IEEE. 2012, pp. 303–310.
- [4] B. F. G. da Silva. "Estudo de soluções alternativas de armazenamento de energia para diferentes horizontes temporais". Dissertação de Mestrado, FEUP, 2008.
- [5] A. Couto. "Integração de um sistema de armazenamento de energia em consumidores de baixa tensão". Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal, 2014.
- [6] C. W. Gellings e W. M. Smith. "Integrating demand-side management into utility planning". Em: *Proceedings of the IEEE* 77.6 (1989), pp. 908–918.
- [7] J. Hong. "The development, implementation, and application of Demand Side Management and control (DSM+ c) algorithm for integrating micro-generation system within built environment". Tese de doutoramento. University of Strathclyde, 2009.
- [8] H. E.C.d. C. Martins. "Consumo inteligente de energia elétrica". Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2015.
- [9] A. Sinha e M. De. "Load shifting technique for reduction of peak generation capacity requirement in smart grid". Em: *Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), IEEE International Conference on*. IEEE. 2016, pp. 1–5.
- [10] S. Duryea, S. Islam e W. Lawrance. "A battery management system for stand alone photovoltaic energy systems". Em: *Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE*. Vol. 4. IEEE. 1999, pp. 2649–2654.
- [11] Á. Gomes, C. H. Antunes, J. Martinho e E. Oliveira. "Otimização multiobjetivo com algoritmos evolutivos-uma aplicação no sector elétrico". Em: *XVI Latin-Ibero-American Conference on Operations Research and XLIV Brazilian Symposium on Operations Research*. 2012.

- [12] D. Magalhães. “Modelo de Baterias com aplicação em sistemas de gestão d baterias (BMS) de Veículos Elétricos (EVs)”. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2013.
- [13] M. M. C. Gaspar et al. “Dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia para melhoria da estabilidade de frequência em redes isoladas com elevada integração de energias renováveis”. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2010.
- [14] X. Luo, J. Wang, M. Dooner e J. Clarke. “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation”. Em: *Applied Energy* 137 (2015), pp. 511–536.
- [15] V. F. Pires, E. Romero-Cadaval, D Vinnikov, I Roasto e J. Martins. “Power converter interfaces for electrochemical energy storage systems–A review”. Em: *Energy Conversion and Management* 86 (2014), pp. 453–475.
- [16] B. Xu. “Degradation-limiting optimization of battery energy storage systems operation”. Dissertação de Mestrado, EEH – Power Systems Laboratory, ETH Zurich, 2013.
- [17] Energy Storage Association, Inc. *Energy Storage Association*. Acedido em: 2017-06-23. URL: <http://energystorage.org/energy-storage>.
- [18] International Electrotechnical Commission (IEC). *Electrical Energy Storage*. Acedido em: 2017-06-23. URL: <https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>.
- [19] J. P. F. Quintanilha. “Sistemas de armazenamento de energia eletroquímica residenciais”. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2014.
- [20] S. S. Néia, A. O. Artero, L. A. P. Cantão e C. B. da Cunha. “Roteamento de Veículos Utilizando Otimização por Colônia de Formigas e Algoritmo Genético”. Em: *Meta-heurísticas em pesquisa operacional. cap 14* (2013), pp. 219–236.
- [21] J. Carr. “An introduction to genetic algorithms”. Em: *Senior Project 1* (2014), p. 40.
- [22] R. Ooka e K. Komamura. “Optimal design method for building energy systems using genetic algorithms”. Em: *Building and Environment* 44.7 (2009), pp. 1538–1544.
- [23] P. Maia. “Despacho óptimo em sistemas eléctricos de energia isolados”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2010.
- [24] A. P. F. Sousa. “Um Algoritmo Genético Para O Planeamento De Rotas Com Considerações Ambientais”. Dissertação de Mestrado, FEP, 2015.
- [25] M. Gen e R. Cheng. *Genetic algorithms and engineering optimization*. Vol. 7. John Wiley & Sons, 2000.
- [26] J. Eduardo, P. Cardoso e J Monteiro. “Gestão de cargas numa micro grid utilizando algoritmos genéticos”. Em: *13ª Conferência sobre Redes de Computadores (CRC'13)*. 2013, pp. 13–18.

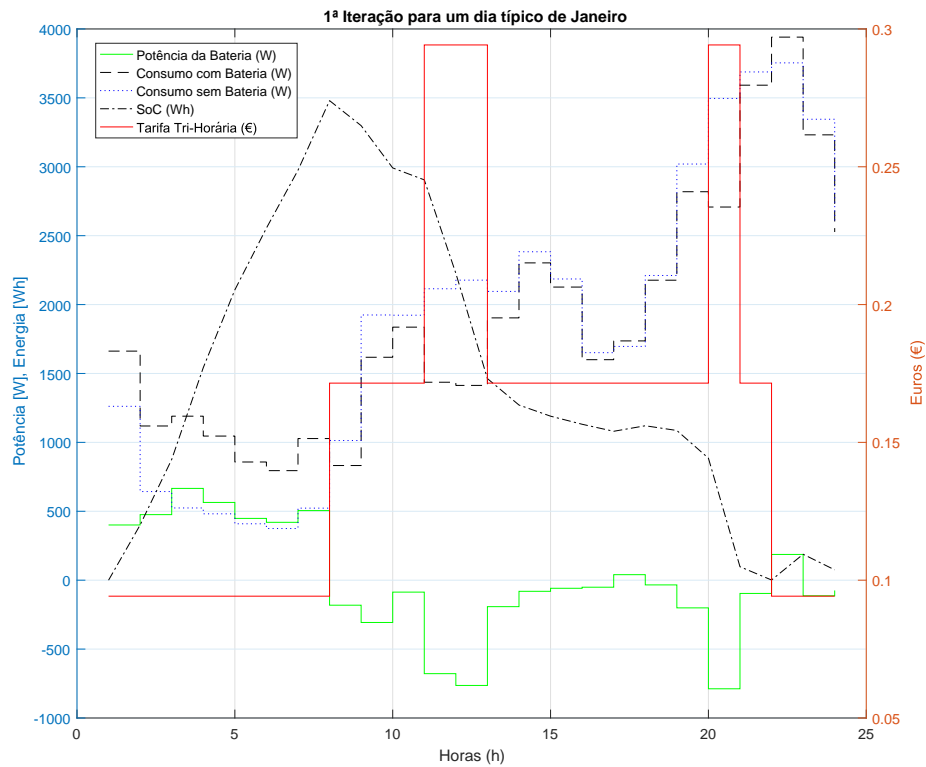
- [27] EDP - Energias de Portugal. *Tarifário - Tri-Horário*. Acedido em: 2018-02-20. URL: <https://www.edp.pt/particulares/apoio-cliente/opcao-horaria/>.

A N E X O

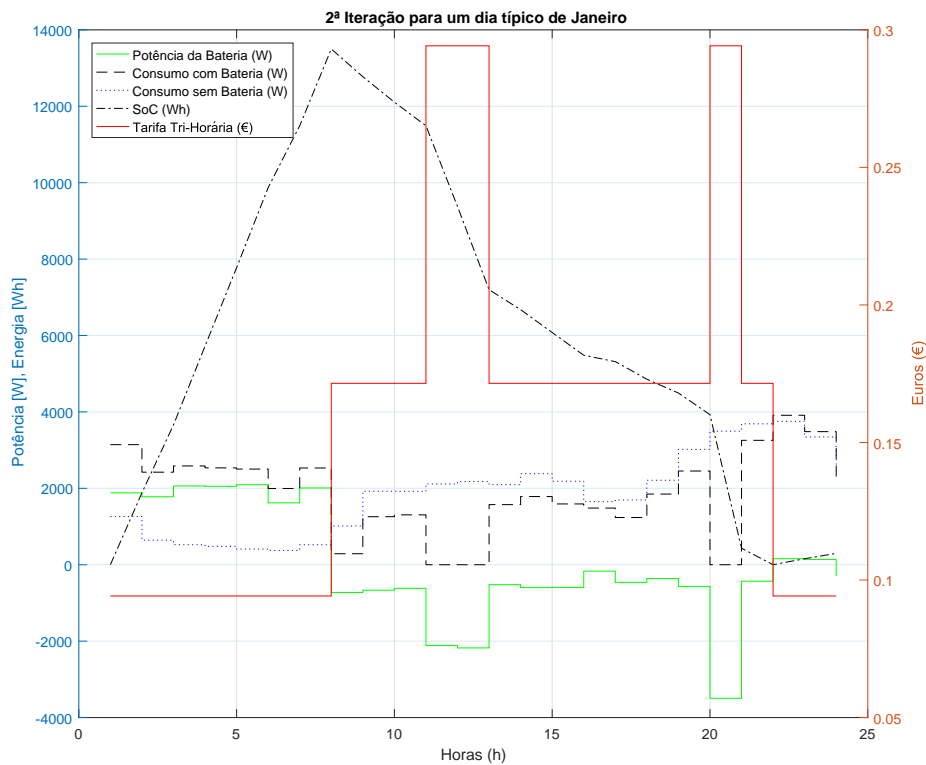


ANEXO 1 - EFEITO DO ALGORITMO GENÉTICO NUM DIA TÍPICO DE CADA MÊS

ANEXO I. ANEXO 1 - EFEITO DO ALGORITMO GENÉTICO NUM DIA TÍPICO DE CADA MÊS

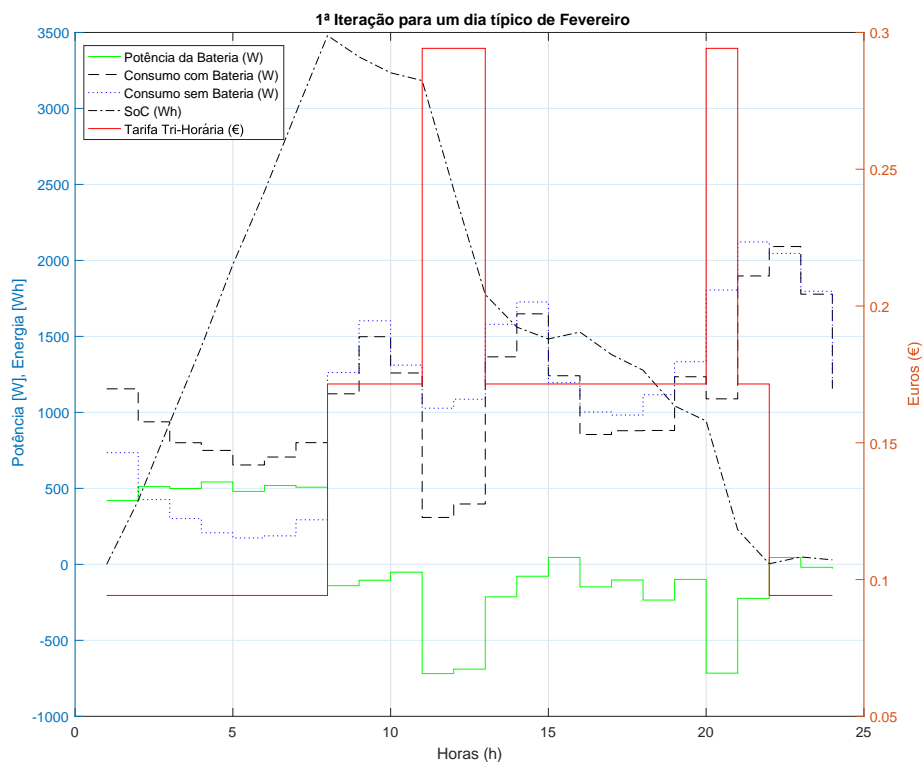


[a]

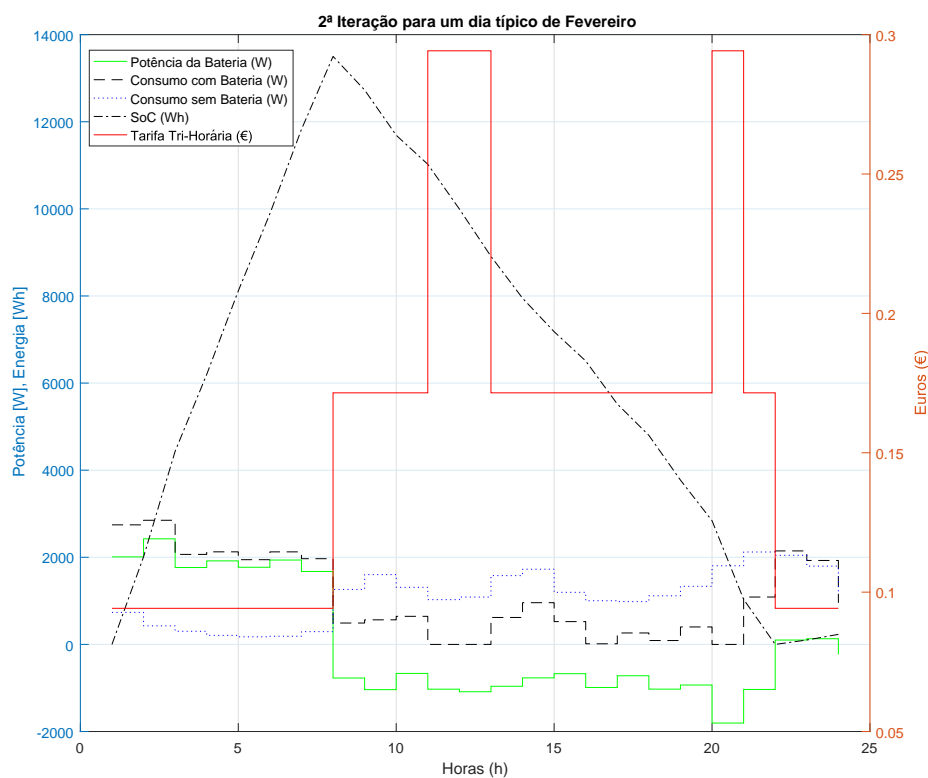


[b]

Figura I.1: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Janeiro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração



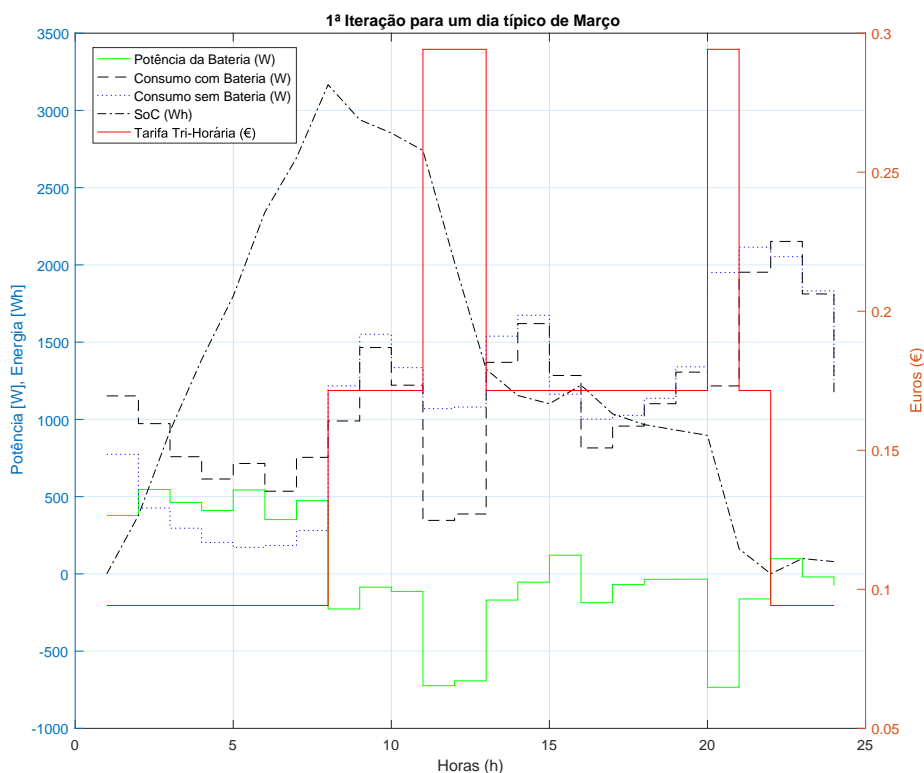
[a]



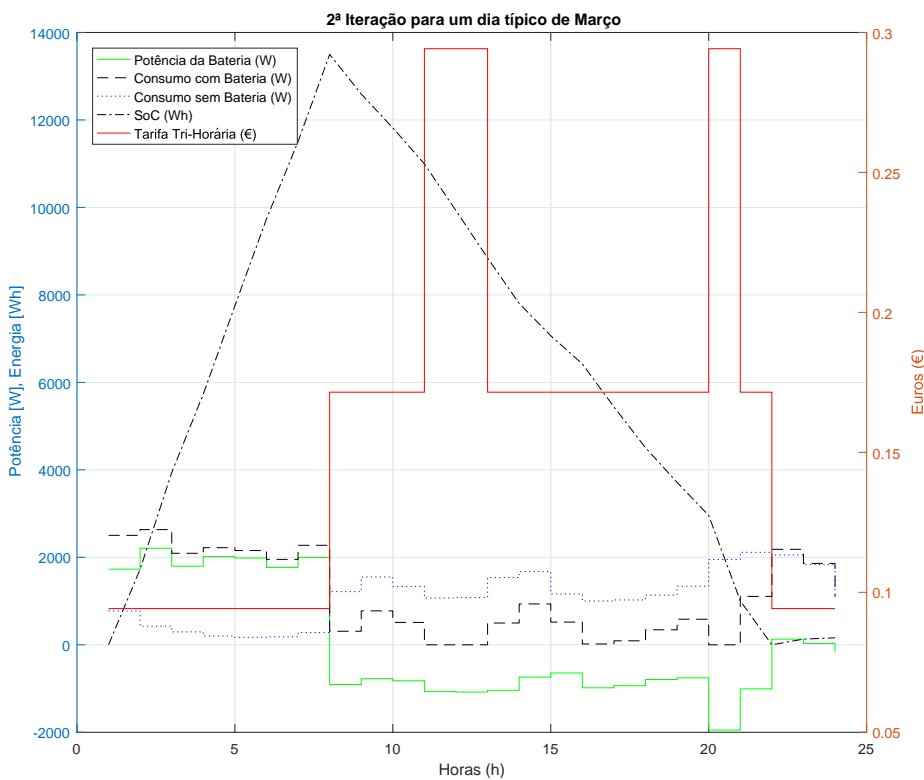
[b]

Figura I.2: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Fevereiro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração

ANEXO I. ANEXO 1 - EFEITO DO ALGORITMO GENÉTICO NUM DIA TÍPICO DE CADA MÊS

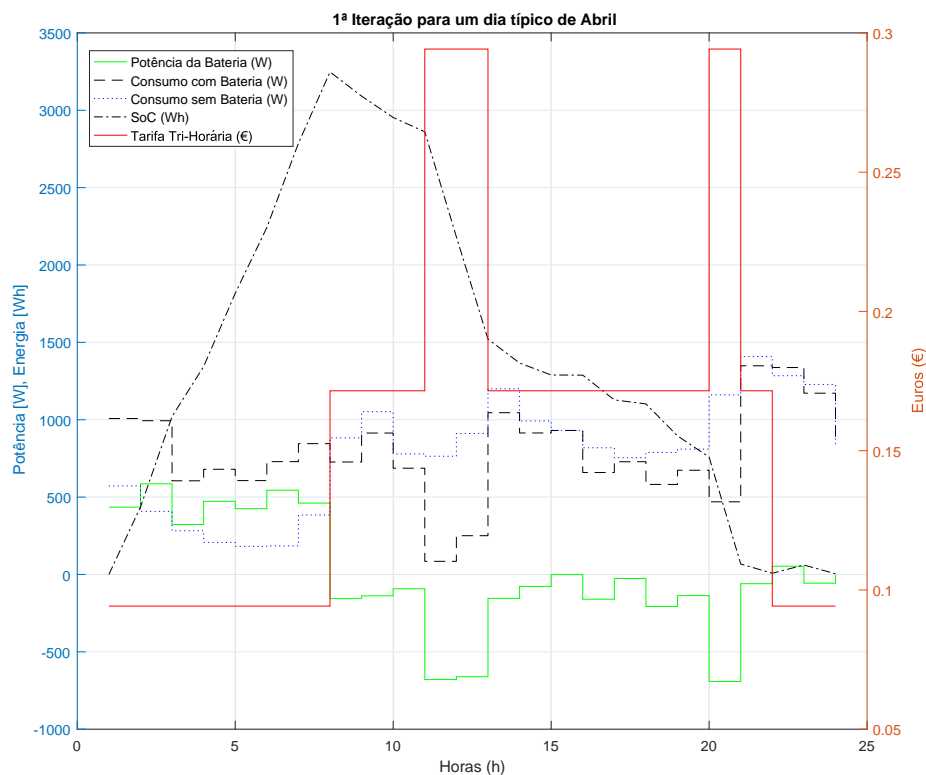


[a]

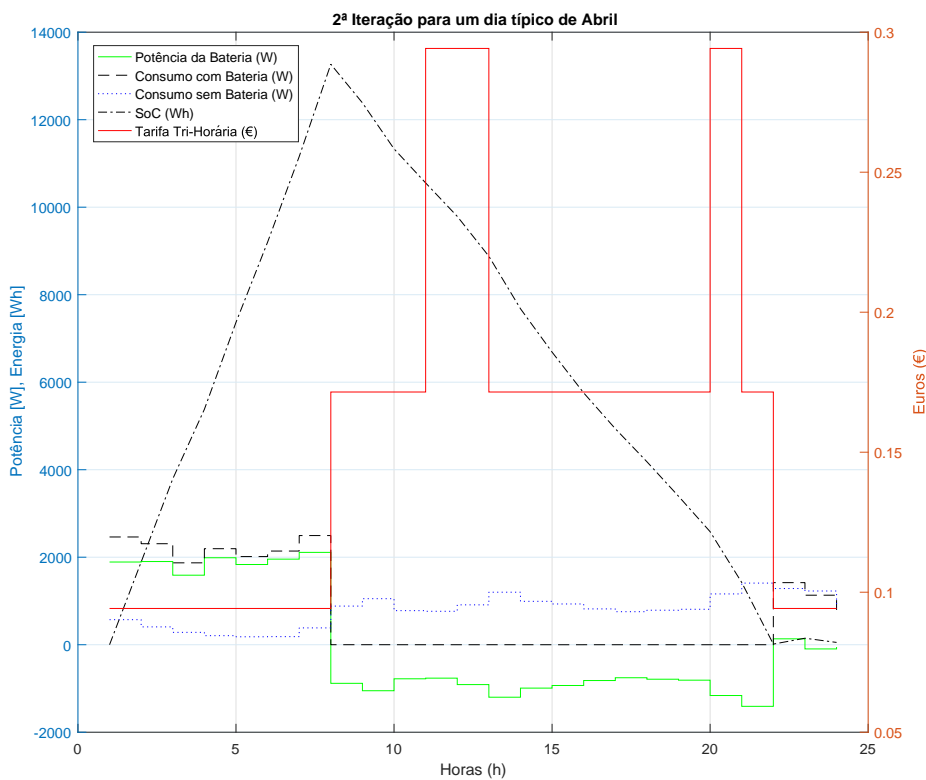


[b]

Figura I.3: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Março (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração



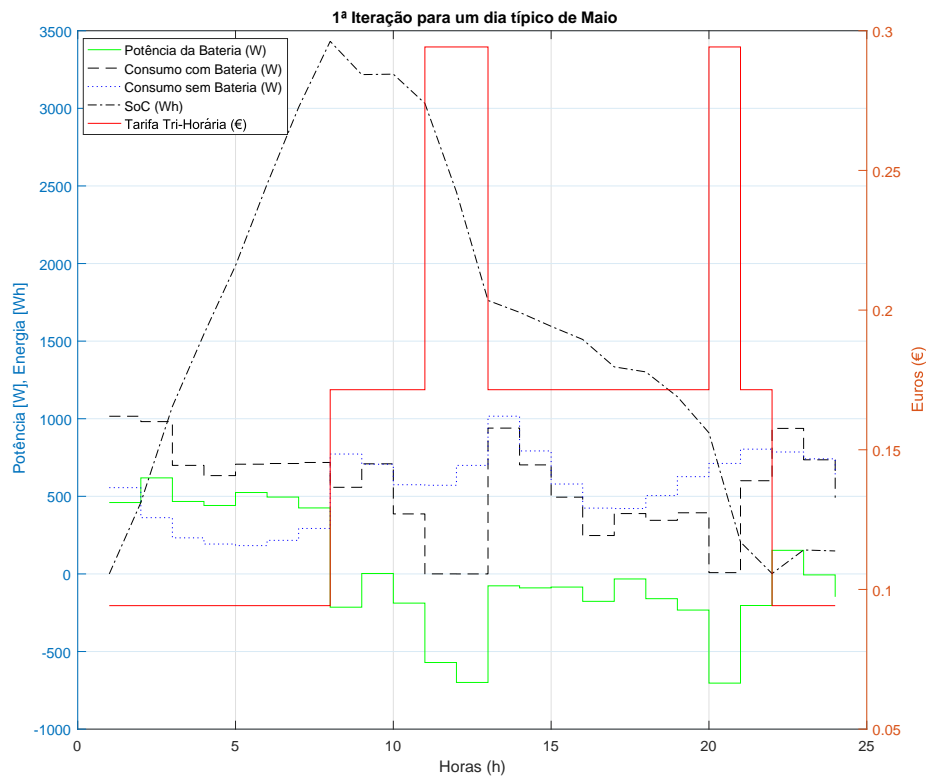
[a]



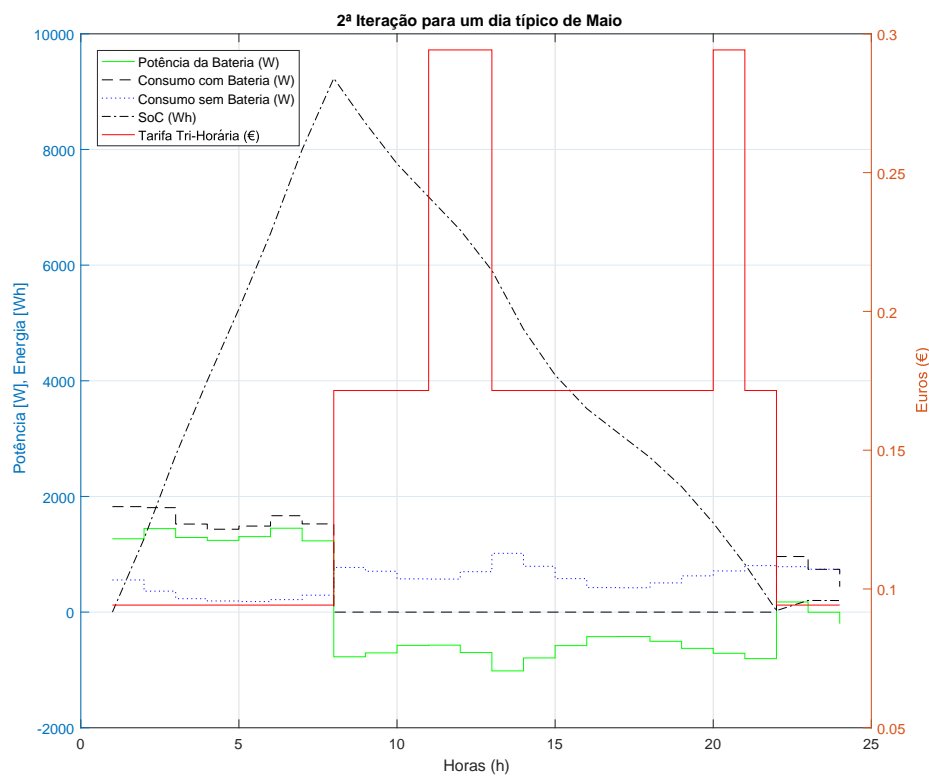
[b]

Figura I.4: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Abril (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração

ANEXO I. ANEXO 1 - EFEITO DO ALGORITMO GENÉTICO NUM DIA TÍPICO DE CADA MÊS

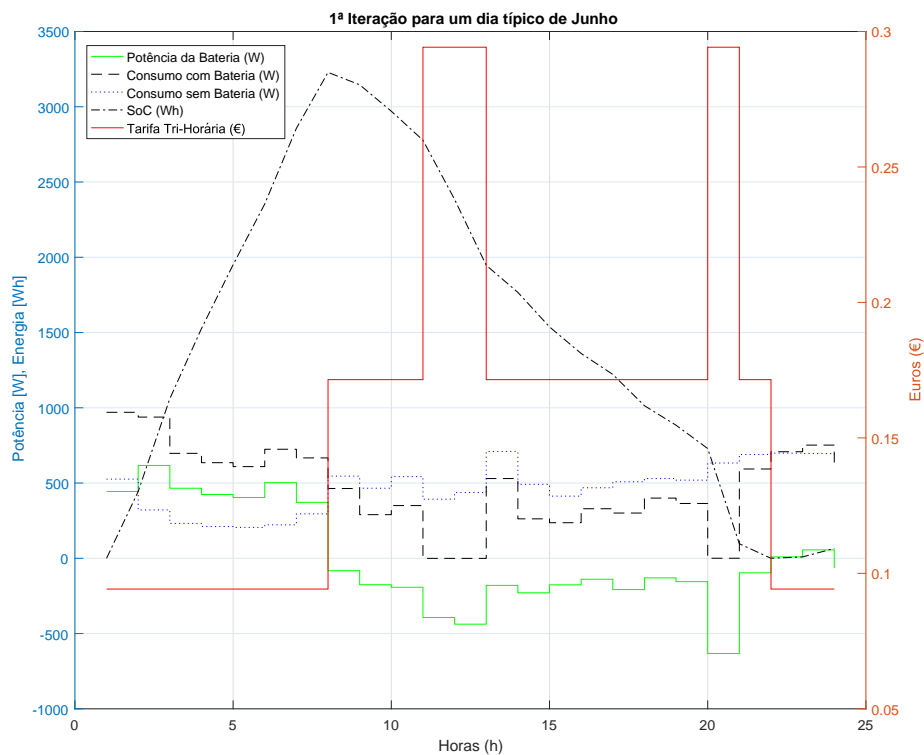


[a]

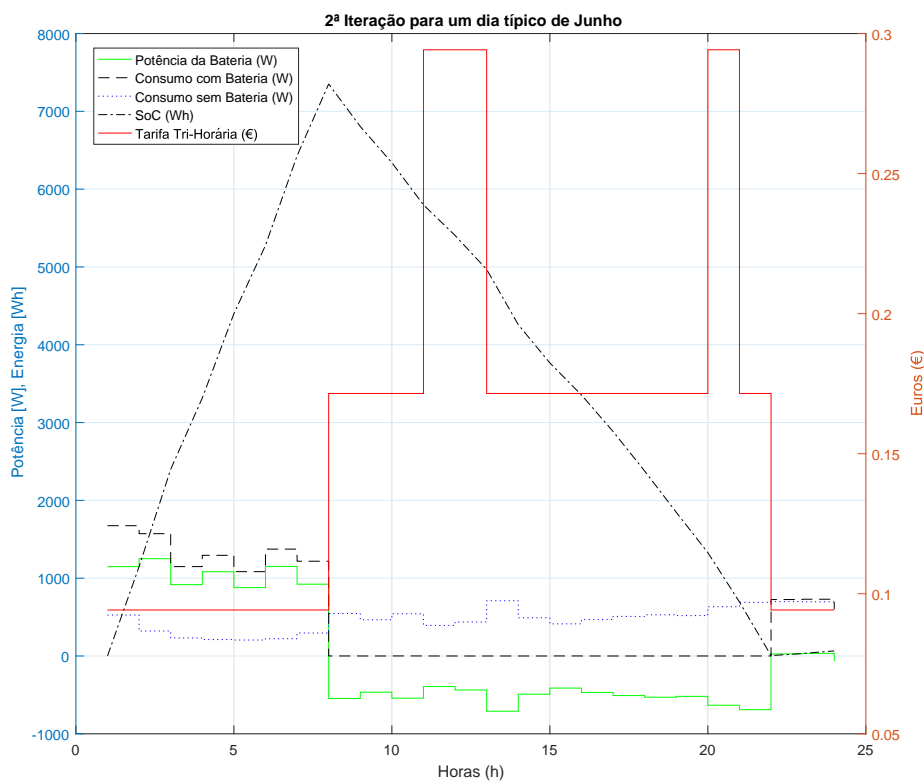


[b]

Figura I.5: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Maio (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração



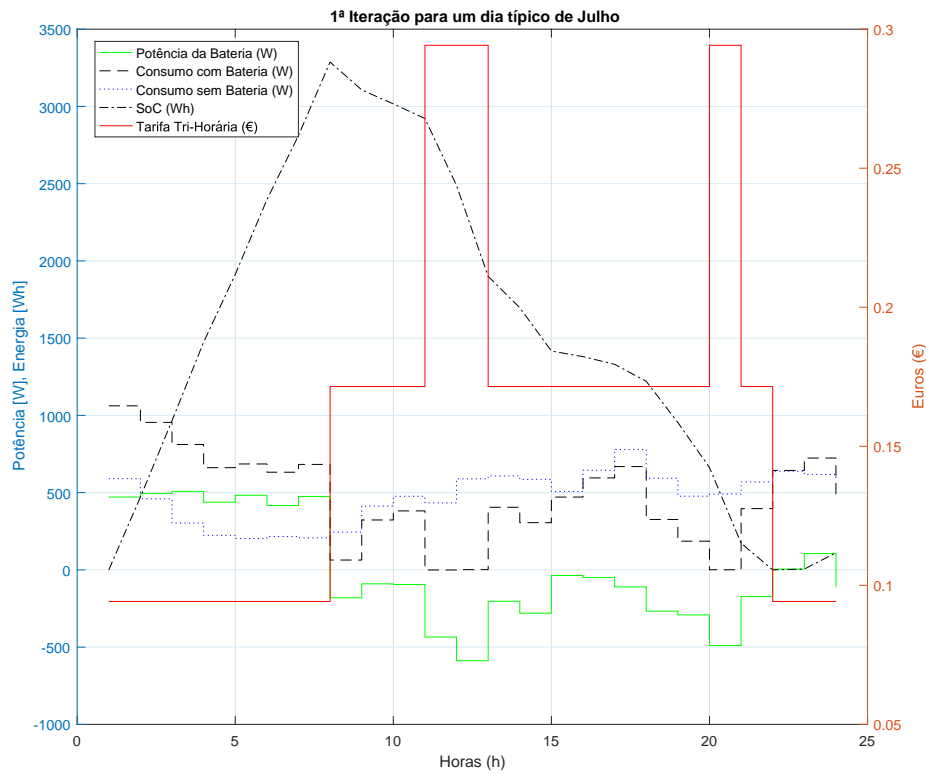
[a]



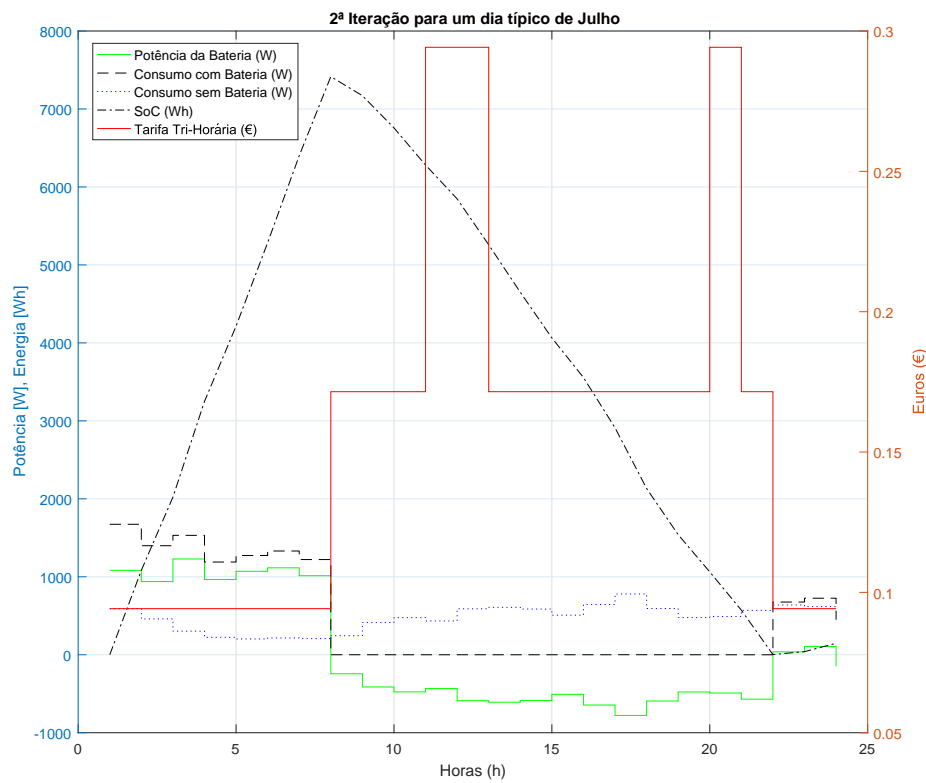
[b]

Figura I.6: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Junho (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração

ANEXO I. ANEXO 1 - EFEITO DO ALGORITMO GENÉTICO NUM DIA TÍPICO DE CADA MÊS

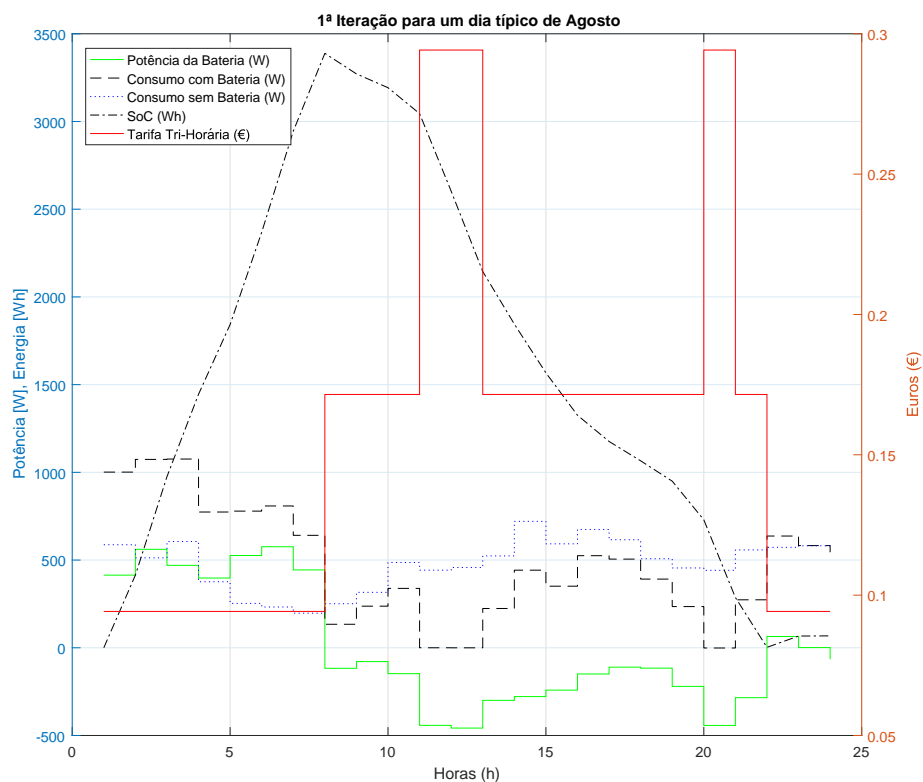


[a]

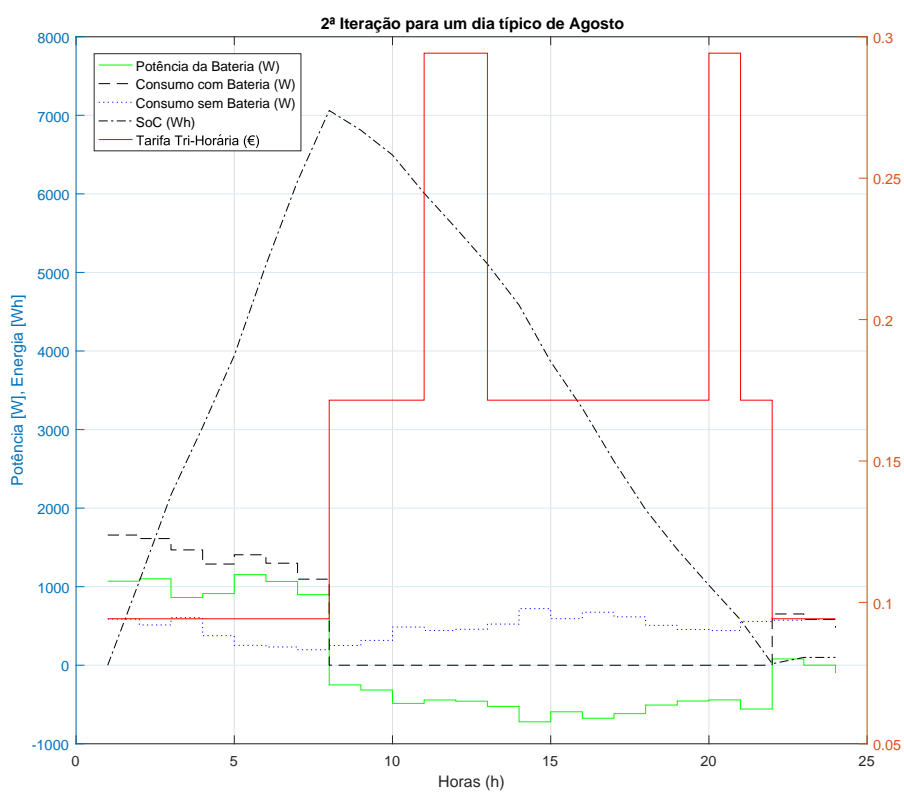


[b]

Figura I.7: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Julho (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração



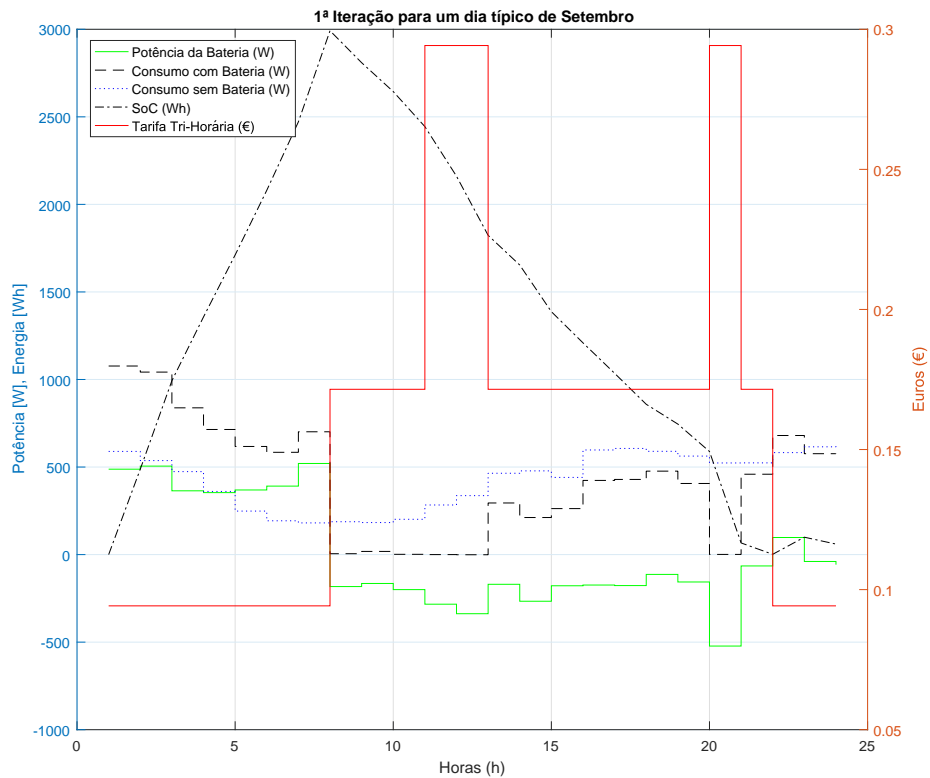
[a]



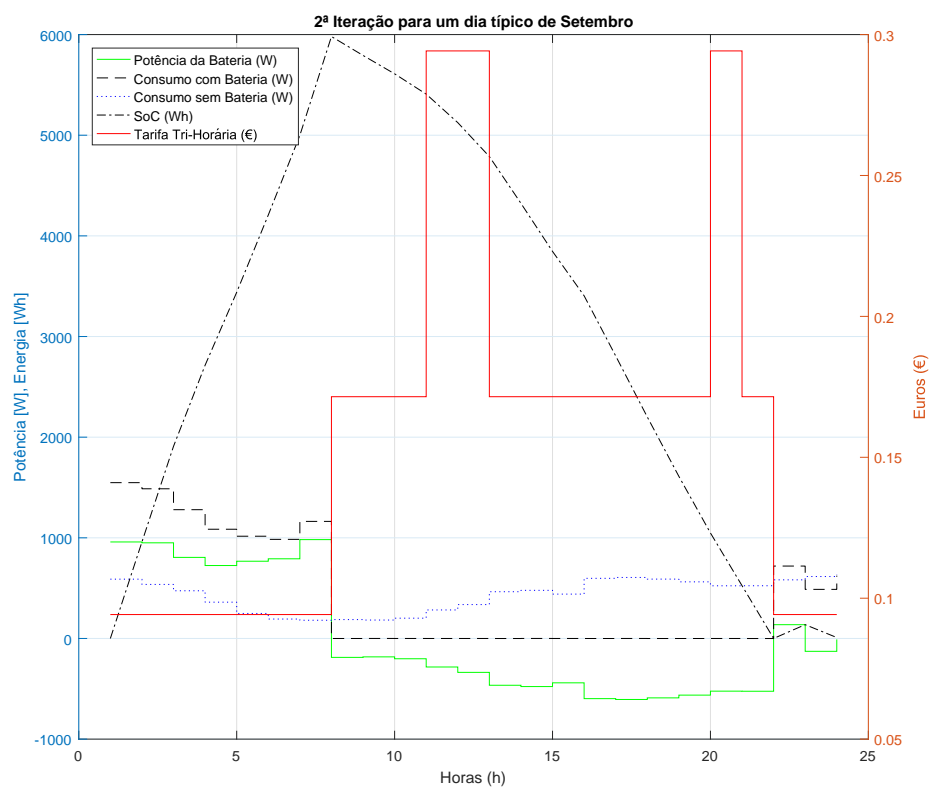
[b]

Figura I.8: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Agosto (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração

ANEXO I. ANEXO 1 - EFEITO DO ALGORITMO GENÉTICO NUM DIA TÍPICO DE CADA MÊS

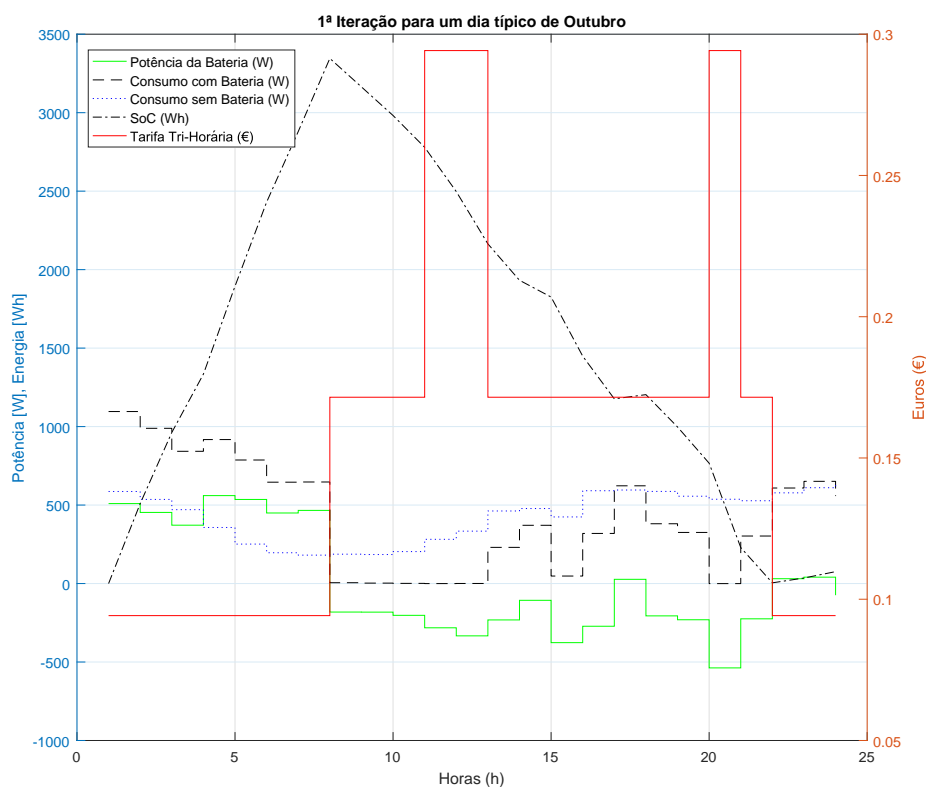


[a]

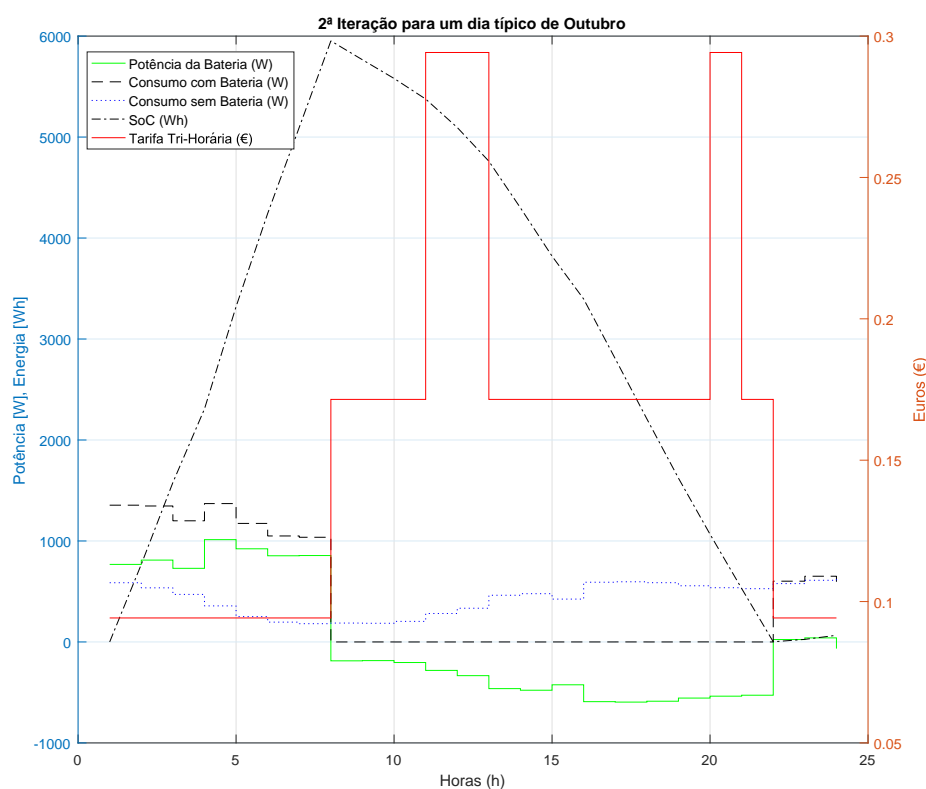


[b]

Figura I.9: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Setembro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração



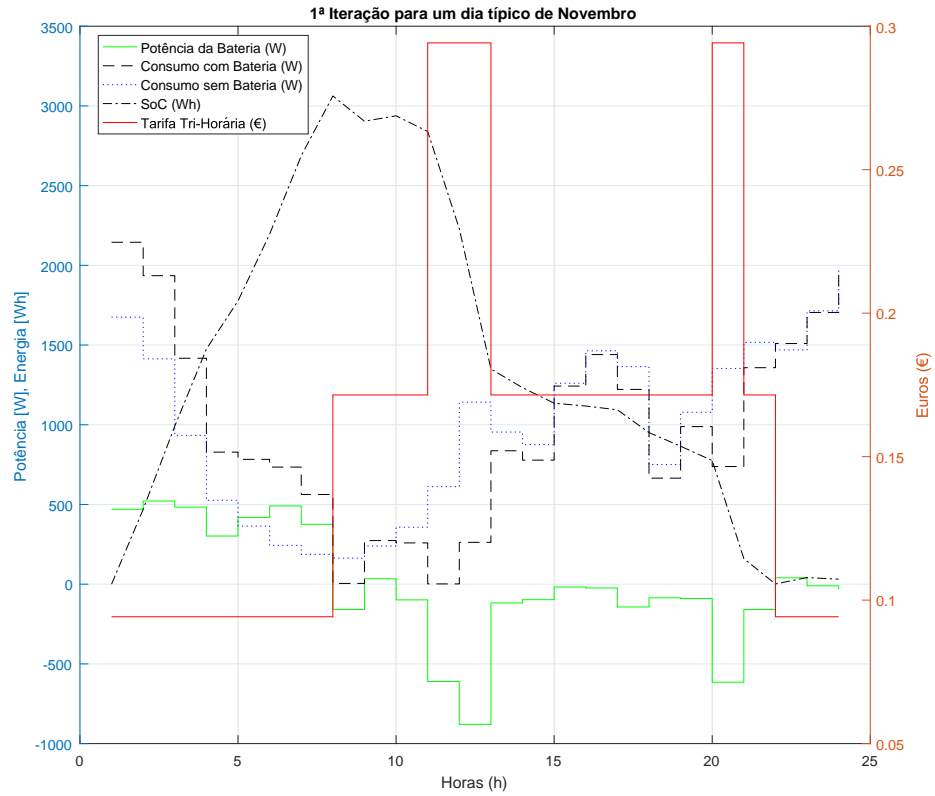
[a]



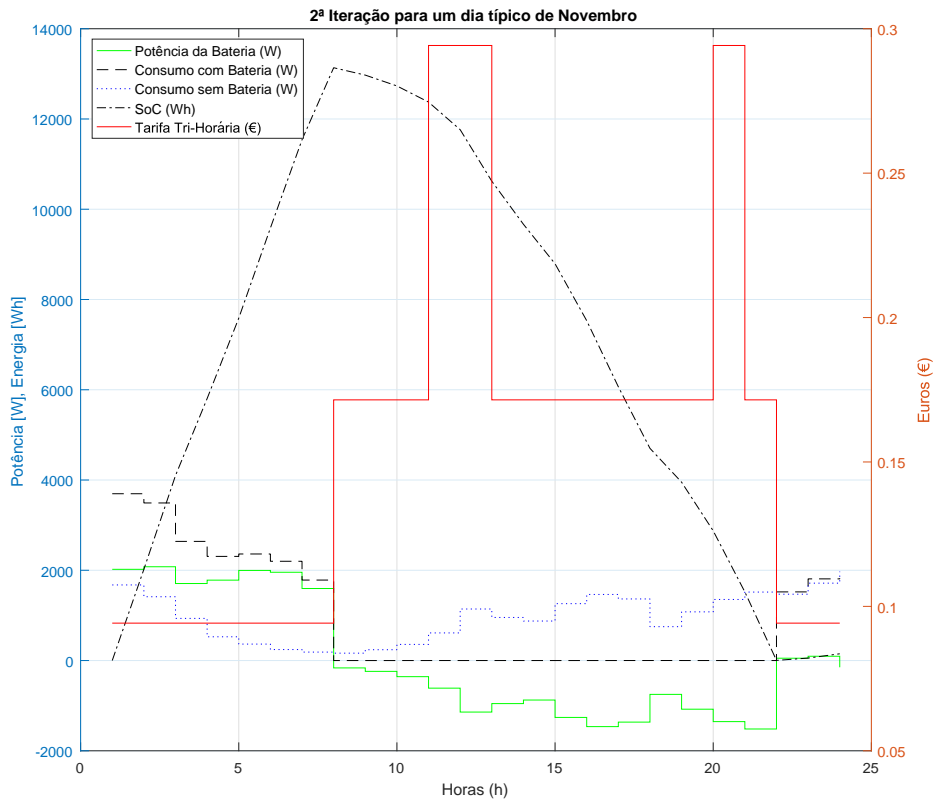
[b]

Figura I.10: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Outubro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração

ANEXO I. ANEXO 1 - EFEITO DO ALGORITMO GENÉTICO NUM DIA TÍPICO DE CADA MÊS

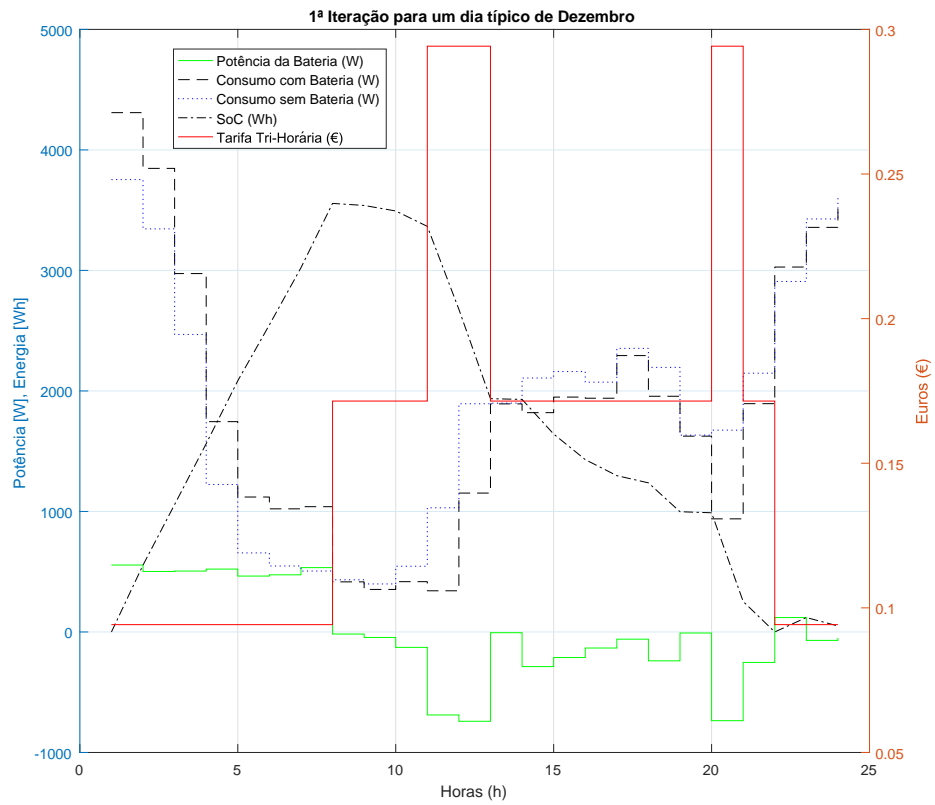


[a]

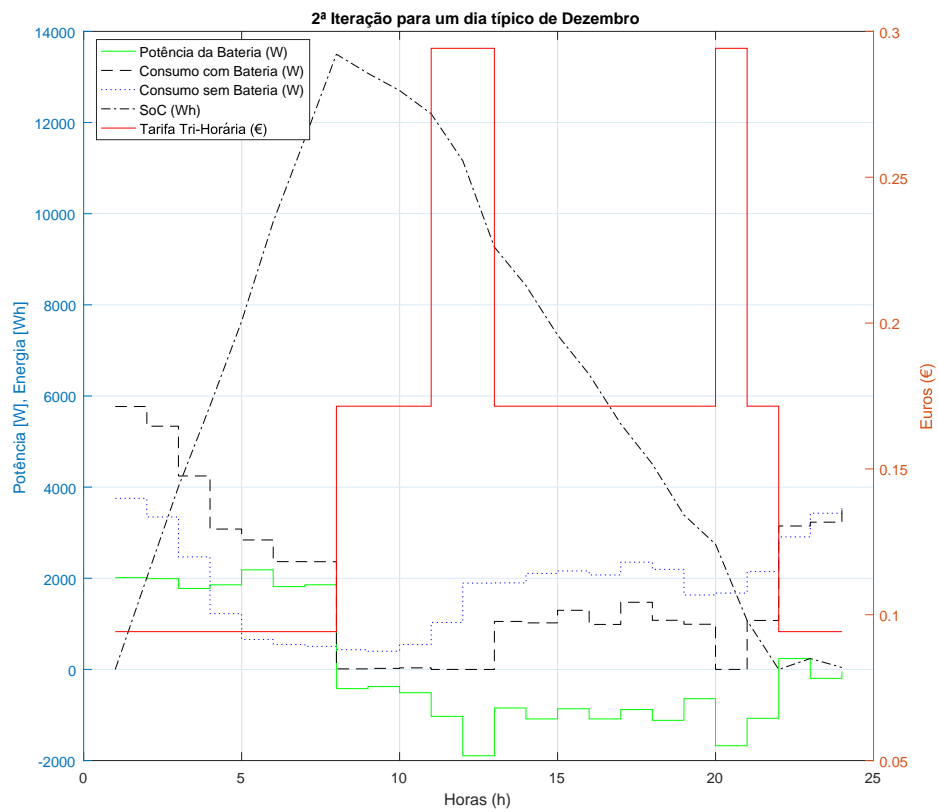


[b]

Figura I.11: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Novembro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração



[a]



[b]

Figura I.12: Efeito do Algoritmo Genético num dia típico de Dezembro (a): 1ª Iteração. (b): 2ª Iteração



ANEXO 2 - COMPORTAMENTO DE UMA BATERIA DE 13,5 kWh PARA VÁRIOS CUSTOS POR kWh

Tabela II.1: Comportamento da bateria de 74,07 €/kWh

Capacidade (Wh)	Preço Energia (€)	Custo Ciclos (€)	Custo Total (€)
5000	1224	1	1225
10000	1209	3	1212
15000	1198	4	1202
20000	1191	6	1197
25000	1185	7	1192
30000	1179	9	1188
35000	1173	10	1183
40000	1172	12	1184
45000	1172	13	1186
50000	1172	15	1187
55000	1172	16	1188
60000	1172	18	1190
65000	1172	19	1191
70000	1173	21	1193
75000	1172	22	1194
80000	1172	24	1196

ANEXO II. ANEXO 2 - COMPORTAMENTO DE UMA BATERIA DE 13,5 KWH
PARA VÁRIOS CUSTOS POR KWH

Tabela II.2: Comportamento da bateria de 222,22 €/kWh

Capacidade (Wh)	Preço Energia (€)	Custo Ciclos (€)	Custo Total (€)
5000	1224	4	1228
10000	1209	9	1218
15000	1198	13	1211
20000	1190	18	1208
25000	1185	22	1207
30000	1179	27	1205
35000	1173	31	1204
40000	1172	36	1208
45000	1172	40	1212
50000	1172	44	1216
55000	1172	49	1221
60000	1172	53	1226
65000	1172	58	1230
70000	1172	62	1234
75000	1172	67	1239
80000	1173	71	1244

Tabela II.3: Comportamento da bateria de 474,07 €/kWh

Capacidade (Wh)	Preço Energia (€)	Custo Ciclos (€)	Custo Total (€)
5000	1224	9	1233
10000	1209	19	1228
15000	1198	28	1226
20000	1191	38	1229
25000	1185	47	1232
30000	1179	57	1235
35000	1173	66	1240
40000	1172	76	1248
45000	1172	85	1257
50000	1172	95	1267
55000	1172	104	1277
60000	1172	114	1286
65000	1172	123	1296
70000	1172	133	1305
75000	1172	142	1314
80000	1172	152	1324

Tabela II.4: Comportamento da bateria de 592,59 €/kWh

Capacidade (Wh)	Preço Energia (€)	Custo Ciclos (€)	Custo Total (€)
5000	1224	12	1236
10000	1209	24	1233
15000	1198	36	1233
20000	1191	47	1238
25000	1185	59	1244
30000	1179	71	1250
35000	1173	83	1256
40000	1172	95	1267
45000	1172	107	1279
50000	1172	119	1291
55000	1172	130	1302
60000	1173	142	1315
65000	1172	154	1326
70000	1172	166	1338
75000	1173	178	1350
80000	1172	190	1362

Tabela II.5: Comportamento da bateria de 740,74 €/kWh

Capacidade (Wh)	Preço Energia (€)	Custo Ciclos (€)	Custo Total (€)
5000	1224	15	1239
10000	1209	30	1239
15000	1197	44	1242
20000	1191	59	1250
25000	1185	74	1259
30000	1179	89	1268
35000	1173	104	1277
40000	1172	119	1291
45000	1172	133	1305
50000	1172	148	1320
55000	1172	163	1335
60000	1172	178	1350
65000	1172	193	1365
70000	1172	207	1380
75000	1172	222	1395
80000	1173	237	1410

ANEXO II. ANEXO 2 - COMPORTAMENTO DE UMA BATERIA DE 13,5 KWH
PARA VÁRIOS CUSTOS POR KWH

Tabela II.6: Comportamento da bateria de 1111,11 €/kWh

Capacidade (Wh)	Preço Energia (€)	Custo Ciclos (€)	Custo Total (€)
5000	1224	22	1246
10000	1209	44	1253
15000	1198	67	1265
20000	1191	89	1279
25000	1185	111	1296
30000	1179	133	1312
35000	1173	156	1329
40000	1172	178	1350
45000	1172	200	1372
50000	1172	222	1395
55000	1172	244	1417
60000	1173	267	1439
65000	1172	289	1461
70000	1172	311	1483
75000	1172	333	1505
80000	1172	356	1528

Tabela II.7: Comportamento da bateria de 1481,5 €/kWh

Capacidade (Wh)	Preço Energia (€)	Custo Ciclos (€)	Custo Total (€)
5000	1224	30	1254
10000	1209	59	1268
15000	1198	89	1287
20000	1191	119	1309
25000	1185	148	1333
30000	1179	178	1357
35000	1173	207	1381
40000	1172	237	1409
45000	1172	267	1439
50000	1173	296	1469
55000	1172	326	1498
60000	1172	356	1528
65000	1172	385	1557
70000	1172	415	1587
75000	1172	444	1616
80000	1172	474	1646